



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**“RENDIMIENTO POTENCIAL Y BRECHAS DE PRODUCCION DE SOJA, MAÍZ Y
TRIGO.”**

AMALIA GRACIELA MANLLA

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DE
RECURSOS NATURALES**

DIRECTOR: ING. AGR. (PhD) FERNANDO SALVAGIOTTI

CO- DIRECTOR: ING. AGR. (MSc) BEATRIZ BONEL

AÑO 2017

“RENDIMIENTO POTENCIAL Y BRECHAS DE PRODUCCION DE SOJA, MAÍZ Y TRIGO.”

AMALIA GRACIELA MANLLA

Ingeniera Agrónoma – Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de los Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en Investigaciones llevadas a cabo en Oliveros, Santa Fe, durante el período comprendido entre 2009 y 2012, bajo la dirección de Ingeniero Agrónomo PhD Fernando Salvagiotti.

Nombre y firma del Maestrando

Nombre y firma del Director

Nombre y firma del Co – Director

Defendida: 3 de Diciembre.de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a mi familia por sentar las bases de que el estudio nunca esta demás en cada uno de nosotros y nos da la libertad de elegir hacer lo que nos gusta!

A mi abuela Nieves por formarme como persona, por transmitirme que siempre hay que seguir para delante y no mirar atrás.

A mi mamá "Tina", un ejemplo a seguir por su entereza y valentía para afrontar hasta las situaciones más difíciles de la vida y aprender de ellas.

A Rubén, mi esposo, mi hogar, gracias por apoyarme en este camino que emprendí y estar en cada momento. A mis hijos Santiago y Martin por todo el amor que me brindan y por hacerme la vida cada día más linda.

A INTA por otorgarme la beca con la cual pude financiar mis estudios de posgrado, al ex Director de la Experimental INTA Oliveros, Ing. Agr. Mario Fernández Alsina por avalar la realización de este posgrado y a la Facultad de Ciencias Agrarias por aceptarme como alumna de la Maestría en Manejo y Conservación de los Recursos Naturales. Agradezco también al proyecto Regional SANFE a partir del cual obtuve una parte de los fondos para realizar los experimentos.

A Silvina Bacigaluppo, a quien le agradezco el empujón que me dio para solicitar y obtener la beca de capacitación para realizar este posgrado y por su constante apoyo cada vez que lo necesité.

A Fernando Salvagiotti, por dirigir este proyecto de investigación y ayudarme con el tema de tesis, por haberme facilitado todas las herramientas para llevar a cabo este trabajo y por su apoyo y buena predisposición en la transmisión de conocimientos. A Beatriz Bonel a quien le agradezco el haber aceptado codirigirme y de la cual colaboré constantemente en cada etapa de esta tesis.

A Evangelina Perotti, gracias por bancarme en momentos de desesperación, por tus consejos y tus valiosos aportes! A Facundo Ferraguti, Ferra gracias por alentarme, por tus sugerencias y por ayudarme siempre. A Julio Castellarín por su asesoramiento y sus aportes que fueron muy bienvenidos para la redacción de esta tesis. A mis compañeros de trabajo, Jose Andriani, Juan Enrico, Andrea Esposito, Luciana Magnano y Nicolas San Marti, que de una u otra forma han colaborado y formado parte de este proyecto.

A los pasantes de la facultad de Ciencias Agrarias. Muchas gracias a Maximiliano Berardi, Emiliano Jozami, Cecilia Perano, Albano Ferrazza, Esteban Kehoe, Virginia Cerántola y Anabel Arcas. A los auxiliares de campo: Ariel Insaurraldi, Omar Rosso, Edgardo Gómez, Ramón Ynfante, Omar Medina y Leandro Martarello.

A todos muchas muchísimas gracias...

*A Rubén, mi cómplice y todo
A mis dos soles Santiago y Martín*

INDICE GENERAL	
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO	1
AMALIA GRACIELA MANLLA	1
PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS	9
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	10
RENDIMIENTO POTENCIAL Y BRECHAS DE PRODUCCION DE SOJA, MAÍZ Y TRIGO .	12
RESUMEN.....	12
GRAIN YIELD POTENTIAL AND GAPS IN SOYBEAN, MAIZE AND WHEAT	14
ABSTRACT.....	14
INDICE DE FIGURAS	15
INDICE DE TABLAS.....	20
CAPITULO 1: INTRODUCCION GENERAL.....	23
1.1.1. La producción de los cultivos en la región pampeana y la demanda de	
alimentos	23
1.1.2. Intensificación de la producción, rendimientos potenciales y brechas de	
rendimiento	24
1.1.3. Características edafo-climáticas de la región agrícola del centro-sur de	
Santa Fe y rendimientos promedio de los principales cultivos	26
1.2 Hipótesis	27
1.3 Objetivo general	27
1.5 Bibliografía	28
CAPITULO 2.....	33
ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN	
SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE	
SIEMBRA Y DEL GENOTIPO.....	33
2.1 Introducción	33
2.2 Materiales y Métodos	36
2.2.1. Sitio experimental, diseño y manejo	36
2.2.2. Muestreos y Determinaciones en planta	37
2.2.4. Registros de Variables Agro-meteorológicas	38
2.2.5. Análisis Estadístico	39
2.3 Resultados	39
2.3.1 Fenología	39

2.3.2 Disponibilidad de Recursos	40
2.3.2.1. Disponibilidad de agua. Precipitaciones	40
2.3.2.2. Oferta de Radiación	42
2.3.2.3. Temperatura	43
2.3.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo	44
2.3.3 Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción	50
2.4 Discusión	62
2.5 Conclusiones	66
2.6 Bibliografía	67
CAPITULO 3.....	74
ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN MAÍZ EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DEL GENOTIPO.....	74
3.1 Introducción	74
3.2 Materiales y Métodos	77
3.2.1. Descripción del sitio Experimental, diseño y manejo.....	77
3.2.2. Muestreos y Determinaciones en planta	78
3.2.4. Registros de Variables Agrometeorológicas	79
3.2.5. Análisis Estadístico	80
3.3 Resultados.....	80
3.3.1 Fenología	80
3.3.2.3. Temperatura	85
3.3.3 Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción	91
3.3.3.1 Brechas de Rendimiento y sus componentes	97
3.3.3.2 Producción de Biomasa e Índice de Cosecha	98
3.4 Discusión	99
3.5 Conclusiones	103
3.6 Bibliografía	104
CAPITULO 4.....	111
ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN TRIGO EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DEL GENOTIPO.....	111

4.1	Introducción	111
4.2	Materiales y Métodos	113
4.2.1.	Descripción del sitio Experimental, diseño y manejo	113
4.2.2.	Muestreos y Determinaciones en planta	115
4.2.3.	Registros de Variables Agrometeorológicas	116
4.3	Resultados.....	117
4.3.1	Fenología	117
4.3.2	Disponibilidad de Recursos	119
4.3.2.1.	Disponibilidad de agua. Precipitaciones	119
4.3.2.2.	Oferta de Radiación	120
4.3.2.3.	Temperatura	121
4.3.3	Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción	129
4.3.3.1	Brechas de Rendimiento y sus componentes	134
4.3.3.2	Producción de Biomasa e Índice de Cosecha	136
4.4	Discusión.....	136
4.5	Conclusiones	141
4.6	Bibliografía	142
	ANEXO III	149
	CAPITULO 5.....	150
	CONCLUSIONES FINALES.....	150

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

“VALIDACIÓN DEL MODELO HYBRID MAIZE EN CONDICIONES ÓPTIMAS DE CRECIMIENTO”. Manlla, A. y Salvagiotti, F. IX Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo. Rosario, Nov. 2010.

“EXPLORANDO BRECHAS DE PRODUCCION Y RENDIMIENTO POTENCIAL EN SOJA: 1) OFERTA DE RECURSOS Y MAXIMOS RENDIMIENTOS ALCANZABLES EN CONDICIONES DE CAMPO”. Manlla, A*. y Salvagiotti, F. 5° Congreso de Soja del Mercosur. Mercosoja. Rosario, Sept. 2011.

“EXPLORANDO BRECHAS DE PRODUCCION Y RENDIMIENTO POTENCIAL EN SOJA: 2) VALIDACIÓN DEL MODELO SOYSIM EN CONDICIONES ÓPTIMAS DE CRECIMIENTO”. F. Salvagiotti* y A. Manlla. 5° Congreso de Soja del Mercosur. Mercosoja. Rosario, Sept. 2011.

SOYBEAN YIELDS AND YIELD GAP ANALYSIS IN THE PAMPAS REGION OF ARGENTINA. Manlla, A. y Salvagiotti, F. IX World Soybean Research Conference, Durban, Febr. 2013.

“RENDIMIENTO POTENCIAL Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN TRIGO SEGÚN FECHAS DE SIEMBRA”. Amalia Manlla*, Julio Castellarín y Fernando Salvagiotti. III Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos. Mar del Plata, Sept. 2017.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Abreviatura/Símbolo	Significado	Unidad
Ant	Estadio Fenológico de Antesis (Trigo)	
Ant-MF	Subperíodo Antesis a Madurez Fisiológica (Trigo)	
AUE	Agua Útil Existente	mm
BT	Biomasa Total	kg ha ⁻¹
CC	Capacidad Campo	mm
R-S	Riego-secano	
CO2	Dióxido de Carbono	
CDH	Con Disponibilidad Hídrica	
DL	Estadio Fenológico de Doble Lomo (Trigo)	
E	Estadio Fenológico de Emergencia	
E-ET	Subperíodo Emergencia a Espiguilla Terminal (Trigo)	
ET-Ant	Subperíodo Espiguilla Terminal a Antesis (Trigo)	
ES	Error Estándar de la media	
ETP	Evapotranspiración Potencial	mm
E-PcR1	Subperíodo de Emergencia hasta Periodo Crítico (15 días antes de Floración) en Maíz	
Fotop	Fotoperiodo	hora
Fs Te	Fecha de siembra Temprana	
Fs I	Fecha de siembra Intermedia	
Fs Ta	Fecha de siembra Tardía	
GDD	Grados Días	°C día
GM	Grupo de Madurez (Soja)	
IC	Índice de Cosecha	
N	Nitrógeno	kg ha ⁻¹
NE	Número de Espigas (Maíz y Trigo)	
NFT	Número de Nudos Fértiles en Tallo Principal (Soja)	
NFTP	Número de Nudos Fértiles en Planta (Soja)	
NG	Número de Granos	granos m ⁻²
NGE	Número de Granos por Espiga (Maíz y Trigo)	
NV	Número de Vainas	vainas m ⁻²
MF	Madurez Fisiológica (Trigo)	
PAs	Máxima Producción Alcanzable en seco	
PcR1	Subperíodo alrededor del Periodo Crítico (15 días pre y pos antesis) en Maíz	
PcR1-R6	Subperíodo desde Floración a Madurez Fisiológica (Maíz)	
PMG	Peso Mil Granos	g
Pp Ac	Precipitaciones Acumuladas	mm
Prom Hist Pp	Promedio Histórico de Precipitaciones Acumuladas	mm
Prom Hist Rad	Promedio Histórico de Radiación Solar Acumulada	Mj m ⁻²
PPG	Producción Potencial de Granos	kg ha ⁻¹
Q 25	Cuartil 25 de la distribución de frecuencia acumulada	
Q 75	Cuartil 75 de la distribución de frecuencia acumulada	
Rad Ac	Radiación Solar Acumulada	Mj m ⁻²
Rto	Rendimiento	kg ha ⁻¹
RAs	Rendimiento Máximo Alcanzable en seco	kg ha ⁻¹
RP	Rendimiento Potencial	kg ha ⁻¹

Abreviatura/Símbolo	Significado	Unidad
RP _s	Rendimientos Potenciales	kg ha ⁻¹
RR	Rendimiento Real	kg ha ⁻¹
R1	Estado Fenológico de Floración (Soja y Maíz)	
R4	Estado Fenológico de grano pastoso (Maíz)	
R5	Estado Fenológico de Inicio de Llenado de Granos en soja	
R6	Estado Fenológico de Madurez Fisiológica (Maíz)	
R7	Estado Fenológico de Madurez Fisiológica (Soja)	
R8	Estado Fenológico de Madurez de Cosecha (soja)	
S	Secano	
SLim	Límite de Estrés Hídrico	mm
T Hist. Máx	Temperatura Histórica Máxima	° C
T Hist. Mín	Temperatura Histórica Mínima	° C
T _n	Toneladas	
T Máx	Temperatura Máxima	° C
T Mín	Temperatura Mínima	° C
Cu	Cultivar (Soja y Trigo)	

RENDIMIENTO POTENCIAL Y BRECHAS DE PRODUCCION DE SOJA, MAÍZ Y TRIGO

RESUMEN

A escala global se proyecta, para el año 2050, un aumento en la demanda de alimentos, por lo que es necesario contar con conocimientos con base científica para intensificar los sistemas agrícolas en forma sustentable. Un aspecto importante es saber la máxima capacidad de producción de los cultivos en función de la disponibilidad de los recursos y la magnitud de las brechas de rendimientos que puedan ser reducidas través del manejo. El rendimiento potencial (RP) es aquel obtenido por un genotipo en un ambiente determinado, sin limitantes de agua y nutrientes, con buenas prácticas agronómicas en ausencia de estreses bióticos y de adversidades. El máximo rendimiento alcanzable en secano (RAs) es el obtenido con la mejor combinación de tecnologías de manejo y de insumos, limitado sólo por déficits de agua en ciertos momentos del ciclo según el régimen hídrico del área. La brecha de rendimiento (diferencia entre RP y RAs) representa la brecha explotable cuando el agua no es limitante o a través de un uso eficiente de la misma.

El objetivo de esta tesis fue cuantificar las variaciones de los RP, RAs y las brechas entre ellos en distintos genotipos de soja, maíz y trigo en función de la fecha de siembra en experimentos a campo.

Durante dos años se sembraron tres experimentos (soja, trigo y maíz) en tres fechas de siembra incluyendo tres genotipos bajo riego y en secano (la diferencia entre los tratamientos riego y secano representa la brecha de rendimiento estudiada en el presente trabajo), sin limitaciones nutricionales y libres de problemas fitosanitarios. En promedio, las brechas relativas oscilaron entre un 3 y 20 % en soja, entre un 6 y 25 % en maíz y entre un 4 y 39 % en trigo. Las mayores brechas relativas en el cultivo de soja se dieron en las fechas de siembras tardías con un valor promedio de 16 % y en trigo estas mayores brechas de rendimiento rondaron entre un 15 y 39 % en las fechas de siembra intermedia y tardía. De la misma forma, en maíz las mayores brechas relativas de rendimiento fueron en las fechas de siembras intermedias y tardías en un rango de 26 y 18 % respectivamente. La magnitud de estas brechas de rendimiento en los tres cultivos (soja, trigo y maíz) tuvieron en común limitantes en la oferta de algunos recursos del ambiente: una menor ocurrencia de precipitaciones en la etapa de definición del rendimiento (acompañado de una mayor demanda atmosférica) en los cultivos de verano y una mayor ocurrencia de elevadas temperaturas durante el periodo crítico de la determinación del número de granos en el maíz y soja o en el periodo de llenado de granos en el trigo, afectando en forma negativa el rendimiento.

En general las brechas relativas RP-RAs observadas fueron menores al 20% en los tres cultivos, por lo que para reducir estas brechas debería apuntarse en hacer un manejo eficiente en el uso del agua y/o utilizar genotipos tolerantes a la sequía. La integración de estas vías permitiría mejorar la producción de granos frente a un escenario climático caracterizado por la erraticidad en las precipitaciones y aumentos graduales en la temperatura global.

GRAIN YIELD POTENTIAL AND GAPS IN SOYBEAN, MAIZE AND WHEAT

ABSTRACT

In order to increase grain yield per unit area, it is important to know the maximum production capacity of different environments as affected by the availability of resources and also the magnitude of existing yield gaps that can be shortened through management. Potential yield (RP) is defined as that obtained by a genotype without water and nutrient limitations, while the water-limited yield (RAs) is that obtained with the best combination of management and input technologies, only limited by water deficits. The yield gap between RP and RAs, is exploitable especially when water is not limiting or through efficient water use. The objective of this thesis was to study variations in potential yields (RP), maximum water limited yield (RAs), and yield gaps between them in different soybean, maize and wheat genotypes as affected by planting date. Experiments (soybean, wheat and maize) were planted in three planting dates with and without irrigation, in absence of nutritional limitations. The largest relative gaps in soybean were observed in late planting dates, averaging 16 %. In maize and wheat the greatest relative yield gaps (26-18 % and 15-39 %) were observed in intermediate and late plantings dates, coinciding with occurrence of low precipitation, high temperatures during the critical period of the crop or during the period of grain filling. In general, the relative yield gaps in the three crops were less than 20%, thus the possibilities of improving production through management are more difficult to happen.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperíodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 para tres cultivares de soja en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2011-2012 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Figura 2.2. Radiación solar acumulada ($Mj\ m^{-2}$) durante los subperíodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 para tres cultivares de soja en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2011-2012 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Figura 2.3. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha siembra temprana (Te) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

Figura 2.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra intermedia (I) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

Figura 2.5. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha siembra tardía (Ta) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

Figura 2.6. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha de siembra temprana (Te) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

Figura 2.7. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra intermedia (I) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress

(Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

Figura 2.8. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra tardía (Ta) con riego (R, arriba) y en seco (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

Figura 2.11. Peso promedio de mil granos (PMG) en el cultivo de soja en función de tres fechas de siembra con riego (R) y en seco (S), años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2011-2012 (panel derecho).

Figura 2.12. Brecha relativa de rendimiento (a), número granos por metro cuadrado (b), número nudos fértiles totales c) y número vainas por metro cuadrado (d) en el cultivo de soja, en función de tres fechas de siembra y tres cultivares. Años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2011-2012 (panel derecho).

Figura 2.13. Relación entre Biomasa Total en R7 y el rendimiento en el cultivo de soja, tres fechas de siembra y dos años de evaluación (símbolos cuadrados: 2009-2010 y círculos: 2011-2012), símbolos llenos con riego (R) y símbolos vacíos en seco (S).

Figura 3.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 para tres híbridos de maíz en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2010-2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Figura 3.2. Radiación solar acumulada ($Mj\ m^{-2}$) durante los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 para tres híbridos de maíz en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2010-2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Figura 3.3. Balance Hídrico del suelo (mm) en maíz, híbrido AX 886, fecha siembra temprana (a), fecha siembra intermedia (b) y fecha de siembra tardía (C) en seco, CC

(capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración) y R6 (Madurez Fisiológica), año 2009-2010.

Figura 3.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en maíz, híbrido AX 886, fecha siembra temprana (a), fecha siembra intermedia (b) y fecha de siembra tardía (C) en secano, CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración) y R6 (Madurez Fisiológica), año 2010-2011.

Figura 3.5. Rendimiento de maíz en función de la fecha de siembra en tres híbridos con riego (R) (panel izquierdo) y en secano (S) (panel derecho). Años (a) 2009-2010 y (b) 2010-2011 Las barras negras representan el error estándar de las medias.

Figura 3.6. Relación entre el número de granos por metro cuadrado (a), el número de granos por espiga (b), la biomasa total (c) y el peso de mil granos (d) con el rendimiento en el cultivo de maíz, en tres fechas de siembra y dos años de evaluación (2009-2010 y 2011-2012). Símbolos llenos tratamientos con riego (R) y símbolos vacíos en secano (S). ES= error estándar de la media.

Figura 3.7. Brecha relativa de rendimiento (a), número granos por metro cuadrado (b), peso de mil granos (c) y número granos por espiga (d) en el cultivo de maíz, en función de tres fechas de siembra y tres híbridos. Años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2010-2011 (panel derecho).

Figura 4.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperiodos E-prA, A y dA-MF para tres cultivares de trigo en tres fechas de siembra en los años 2010 (a) y 2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Figura 4.2. Radiación solar acumulada ($Mj m^{-2}$) durante los subperiodos E-prA, A y dA-MF para tres cultivares de trigo en tres fechas de siembra en los años 2010 (a) y 2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.).

Figura 4.3 Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra temprana (Te) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), MF (Madurez Fisiológica). Año 2010.

Figura 4.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra Intermedia (I) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), MF (Madurez Fisiológica). Año 2010.

Figura 4.5. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra tardía (Ta) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2010.

Figura 4.6. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha de siembra temprana (Te) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2011.

Figura 4.7. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra intermedia (I) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2011.

Figura 4.8. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3304, fecha siembra tardía (Ta) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2011.

Figura 4.9. Relación entre el número de granos por metro cuadrado y el rendimiento en el cultivo de trigo, en tres fechas de siembra y dos años de evaluación (2010 y 2011). Símbolos llenos con riego (R) y símbolos vacíos en secano (S).

Figura 4.10. Brechas relativas de rendimiento (a), número granos por metro cuadrado (b), número espigas por metro cuadrado (c) y peso mil granos (d) en el cultivo de trigo, en función de tres fechas de siembra y tres cultivares. Años 2010 (panel izquierdo) y 2011 (panel derecho).

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Fechas de siembra del cultivo de soja en la EEA Oliveros. Años 2009-2010 y 2011-2012

Tabla 2.2. Duración de las etapas (días) en el cultivo de soja por subperiodo: E-R1, R1-R5 y R5-R7 según fecha de siembra y cultivar. Años 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 2.3. Temperatura Máxima (T°C Máx), Temperatura Mínima (T°C Mín) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx- T Hist. Mín), en los subperiodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 en tres cultivares de soja y tres fechas de siembra. Años 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 2.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa Total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g.) e índice de cosecha (IC), número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP), número nudos fértiles total por planta (NFT) y número de vainas por metro cuadrado (NV). Años 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 2.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13% humedad en soja, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres grupos de madurez de soja: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Año 2009-2010.

Tabla 2.6. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13% humedad, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres grupos de madurez de soja: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Año 2011-2012.

Tabla 2.7. Promedios del número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP), el número nudos fértiles totales por planta (NFT) y el número de vainas por metro cuadrado (NV) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, en tres grupos de madurez de soja: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Años 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 3.1. – Fechas de siembra del cultivo de maíz en la EEA INTA Oliveros. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Tabla 3.2. Duración de las etapas (días) y los grados días acumulados (GDD) en el cultivo de maíz por subperiodo: emergencia a floración (E-R1) y de floración a madurez fisiológica (R1-R6) según fecha de siembra e híbrido. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Tabla 3.3. Temperatura Máxima (T°C Máx), Mínima (T°C Mín) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx.-T Hist. Mín.), en los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 en tres híbridos de maíz y tres fechas de siembra. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Tabla 3.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S). Años 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 3.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 14% humedad, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g.), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres híbridos de maíz. (ES= error estándar de la media). Año 2009-2010.

Tabla 3.6. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 14% humedad en maíz, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres híbridos de maíz. (ES= error estándar de la media). Año 2010-2011.

Tabla 4.1 – Fechas de siembra del cultivo de trigo en la EEA INTA Oliveros. Años 2010 y 2011.

Tabla 4.2. Duración de las etapas (días) y grados días acumulados (GDD) en el cultivo de trigo desde emergencia a 20 días previo a antesis (prA -A), periodo alrededor de antesis (A)

y después de antesis a madurez fisiológica (dA-MF) según fecha de siembra y cultivar. Años 2010 y 2010.

Tabla 4.3. Temperatura Máximas (T Máx.), Mínima (T Mín.) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx.- T Hist. Mín.), en los subperiodos E-prA, A, y dA-MF en tres cultivares de trigo y tres fechas de siembra. Años 2010 y 2011.

Tabla 4.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC), y número de espiga por metro cuadrado (NE). Años 2010 y 2011.

Tabla 4.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13,5 % humedad en trigo, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número espigas por metro cuadrado (NE) con riego (R) y secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, (ES= error estándar de la media). Año 2010.

Tabla 4.6. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13.5 % humedad en trigo, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número espigas por metro cuadrado (NE) con riego (R) y secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, (ES= error estándar de la media). Año 2011.

CAPITULO 1: INTRODUCCION GENERAL

1.1 Antecedentes de la problemática de la región

1.1.1. La producción de los cultivos en la región pampeana y la demanda de alimentos

A escala global se proyecta, para el año 2050, un importante aumento en la demanda de alimentos, en una cifra cercana a los 3 billones de ton de cereales por año (Bruinsma, 2009). Para satisfacer esta demanda, existen dos alternativas: i) aumentar la productividad de los cultivos por unidad de superficie (i.e. intensificación de la producción) y/o ii) expandir la superficie cultivable. La primera alternativa demanda la incorporación de un mayor nivel tecnológico en los sistemas agrícolas, aplicado racionalmente de modo de no afectar negativamente el ambiente. La segunda alternativa es menos probable de implementar como estrategia en el mediano plazo, ya que implicaría incorporar tierras marginales o no aptas para la agricultura aumentando los procesos erosivos de los suelos. Estudios realizados en el 2008 por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable mostraron que Argentina entre los períodos 1998-2002 y 2002- 2006 redujo su superficie de bosques nativos en un total de 2.295.567 has deforestadas, como consecuencia de la expansión agrícola.

En la región pampeana, hasta los años 80, los sistemas agrícolas alternaban cultivos de granos, especialmente maíz y trigo, con pasturas. Sin embargo el cultivo de soja comenzó a difundirse a partir de los años 70, para luego en las siguientes décadas incrementar su expansión, desplazando a los otros cultivos (trigo, maíz, sorgo, girasol) con un predominio creciente del monocultivo (Michelena et al., 1989), principalmente por la elevada rentabilidad y con los menores costos de implantación (Pengue, 2005). A partir de la década del 90 con la incorporación de la siembra directa, el uso de genotipos resistentes a plagas, malezas y enfermedades y un mayor uso de la fertilización en el planteo de producción, se incrementó la producción de granos de los principales cultivos tanto por un aumento en la superficie cultivada, como así también por un uso más intenso de los recursos naturales. Entre los años 1960 y 2010, los cultivos de maíz y soja incrementaron el rendimiento a una tasa de 110 y 35 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Salvagiotti, 2009, 2010). En tanto que en trigo la tasa de rendimiento se incrementó en un principio 32 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1970 y 1990) y luego 50 kg ha⁻¹ año⁻¹ (años 2000-2016; Abbate et al., 2017). Entre 1990 y 2010 la producción total anual de soja pasó de 10 a 40 millones de tn año⁻¹ y el maíz pasó de producir 20 a 70 millones de tn año⁻¹ (García et al., 2010). Durante la campaña 2015/2016, Santa Fe contribuyó a la producción nacional con un 8 % de maíz, un 16 % de

soja y un 15 % trigo, lo cual representa un total de 476.450 has de maíz, 3.123.327 has para soja y 597.990 ha para trigo (Ministerio Agroindustrias, 2017). Estas cifras muestran un desbalance en las proporciones de los cultivos, evidenciando un predominio del monocultivo de soja, el cual está asociado a un bajo aporte de residuos y baja frecuencia de fertilización (García et al., 2009), situación que puede provocar el deterioro físico-químico de los suelos (Alvarez et al., 2009; Andriulo et al., 1996; Micucci and Taboada, 2006; Sasal et al., 2006), generando interrogantes acerca de la sustentabilidad del sistema de producción y el impacto sobre el ambiente.

1.1.2. Intensificación de la producción, rendimientos potenciales y brechas de rendimiento

En un escenario productivo donde el incremento de la producción de granos por unidad de superficie es clave, es necesario contar con conocimientos con base científica para intensificar los sistemas agrícolas en forma sustentable en función de los recursos disponibles (Caviglia y Andrade, 2010). Uno de los aspectos estrechamente ligado con este concepto es el conocimiento de i) la máxima capacidad de producción en diferentes ambientes en función de la disponibilidad de los recursos y ii) la magnitud de las brechas de rendimientos existentes que puedan ser acortadas a través del manejo.

El rendimiento potencial (RP) de un cultivo se define como el rendimiento obtenido por un genotipo sin limitantes de agua y nutrientes que crece en un ambiente determinado en ausencia de estreses bióticos (insectos, malezas y enfermedades) y abióticos (granizo, heladas, etc). Para un genotipo definido, el RP está determinado por la disponibilidad de CO₂, la oferta de radiación solar, la temperatura del aire y el fotoperiodo, denominados factores definidores del rendimiento (van Ittersum y Rabbinge, 1997). El máximo rendimiento alcanzable en seco (RAs) es aquel obtenido con la mejor combinación de tecnologías de manejo y de insumos, pero limitado por déficits de agua en algún momento del ciclo de acuerdo al régimen hídrico del área (Lobell et al., 2009). La diferencia de rendimiento entre RP y RAs representa la brecha de rendimiento mejorable a través de tecnologías que permitan un aporte suplementario o un mejor aprovechamiento del agua. Por otra parte, la brecha entre RAs y el rendimiento real (RR), obtenido bajo condiciones de producción en seco con tecnología de insumo y proceso promedio (Lobell et al, 2009), puede ser reducida a través del manejo del cultivo en general. En este sentido Cassman (1999) propone que existe más probabilidad de incrementar la producción de granos a través de un mejor manejo que permita aumentar la producción por unidad de superficie en aquellos ambientes donde las brechas de rendimiento sean mayores al 20 %.

Entonces, para una determinada área, la producción potencial de granos (PPG), la máxima producción alcanzable en condiciones de secano (PAs) y las brechas de producción entre ambos estarán determinados por:

- i) la oferta de los recursos ambientales que definen el rendimiento (radiación, CO₂, régimen de temperaturas, fotoperiodo, agua y nutrientes) durante los periodos críticos de determinación del mismo lo cual estará asociado al cultivar y al manejo del cultivo (fecha de siembra, espaciamiento y densidad de plantas)
- ii) la eficiencia en el uso de los recursos por parte del cultivo
- iii) las variaciones espaciales de los factores de la producción en función del suelo, y la capacidad de estos de almacenar agua y de ofrecer nutrientes (Caviglia, et al., 2004; Monzón, et al., 2007).

Por lo tanto la fecha de siembra es uno de los factores posibles de manejar en combinación con una correcta elección del cultivar, permitiendo estudiar la máxima producción de un área teniendo en cuenta que el adelanto o el atraso de la misma generan cambios en el régimen fototérmico y en la oferta hídrica. Estas variaciones en la fecha de siembra de un cultivar afectan su respuesta en cuanto a su producción (biomasa y granos cuando éste se acerca o se aleja de su fecha de siembra óptima en función de su ciclo de madurez o hábito de crecimiento (Otegui, M. y López Pereira, M., 2003; Garcia, F., Ciampitti, I. y Baigorri, H., 2009).

En el sur de Santa Fe la fecha óptima de siembra (donde el periodo crítico se ubica en el momento de máxima oferta de recursos: luz, temperatura, nutrientes y agua) para el cultivo de soja es durante el mes de noviembre (Enrico et al., 2013); en el cultivo de maíz es en la segunda quincena de septiembre (Otegui et al., 1996; Cirilo et al., 1994) , aunque en la actualidad la tendencia del productor en la zona es sembrar en forma tardía y/o de segunda (mediados de diciembre) dado por una mayor estabilidad del rendimiento comparado a la siembra de septiembre (Otegui et al., 1995, Mercau et al., 2014) . En tanto que en el cultivo de trigo se considera como fecha óptima de siembra en la primera quincena de Junio (Castellarín et al., 2012).

Además de las variaciones en el tiempo, se presentan variaciones en el espacio de estos factores de la producción que se verían reflejados en la variabilidad de los RP, RAs, RR y las brechas de rendimiento, que son característicos de cada área bajo estudio. A escala global, Lobell et al., (2009) sugirieron que la brecha de rendimiento entre RP y RAs en los cultivos de trigo, maíz y arroz varía entre un 20% y un 80%.

En general, los estudios de RP y brechas de rendimiento han analizado aquellas fechas de siembras donde se maximiza el RP (Zhang et al., 2009, 2010; Orgeval et al., 2010; Specht et al., 2006). En muchas de estas experiencias los análisis se realizan teniendo en cuenta una condición agroclimática estrecha (definida por la fecha media de ocurrencia de heladas según el cultivo) dado que en algunas regiones este período puede ser limitado como en Estados Unidos, Norte de China o Norte de Europa (Grassini et al., 2011; Wei-li et al., 2011; Peltonen-Sainio, et al., 2009).

En cambio en áreas como la región pampeana, el período libre de heladas es mucho más amplio, especialmente en la medida que se avanza hacia el norte de esta región. En consecuencia, existirán un conjunto de RPs y de brechas de rendimiento que surgirán de las distintas combinaciones de fechas de siembras y cultivares dentro de los límites de manejo de este periodo. Entonces en estas situaciones, no solo es importante conocer el RP en la fecha óptima, sino también conocer la tasa de cambios de los RP y las brechas de rendimiento en función de la fecha de siembra.

En Argentina, los estudios de brechas de rendimiento y RP son aislados. Algunas referencias muestran los resultados de concursos de rendimientos en maíz o soja (Salvagiotti, 2009), o se han hecho estimaciones utilizando diversos modelos (Magrin et al., 1991; Ruiz et al., 1998; Salvagiotti et al., 2003, 2016 y Menéndez et al., 2007). En trigo Abbate (1997) estimó el rendimiento potencial mediante una relación directa entre factores climáticos y los componentes de rendimiento. Sin embargo, no existen estudios en la zona que permitan conocer las variaciones de los RP y las brechas de producción en función de la variación de la fecha de siembra en combinación con distintos cultivares. Esta información permitirá identificar limitantes en el manejo de los cultivos para disminuir las brechas de producción y de esta manera aumentar la productividad por unidad de superficie.

1.1.3. Características edafo-climáticas de la región agrícola del centro-sur de Santa Fe y rendimientos promedio de los principales cultivos

La región agrícola del centro- sur de Santa Fe, ubicada en la región pampeana norte, incluye suelos bien desarrollados sobre material loésico bajo un régimen húmedo y cuenta con un clima de características mediterráneas donde la distribución de las precipitaciones en el espacio y en el tiempo son muy variables (Mosconi et al., 1981). Los principales suelos son los Argiudoles típicos y en algunos sectores ácuicos, y hacia el sudoeste del departamento. General López se asocian Hapludoles énticos y típicos (Giorgi et al., 2008). Estos suelos pueden almacenar entre 250 (Hapludoles) y 300 (Argiudoles) mm de agua útil (Andriani, 2000). El periodo libre de heladas, que determina las probabilidades de éxito de

los cultivos de verano va desde mediados de septiembre a mediados de mayo en el sur y desde fines septiembre a fines de mayo en el centro de la provincia. Por otra parte, la fecha media de heladas tardías, que determina la época de siembra de los cultivos invernales oscila entre mediados de octubre y ocasionalmente principios de noviembre.

Los rendimientos promedio de los cultivos de soja, trigo y maíz entre 1970 y 2015 en el sur de Santa Fe (Belgrano, Gral. López, Constitución, Rosario, Iriondo, San Lorenzo y Caseros) fueron de 2.256, 2.147 y 4588 kg ha⁻¹, respectivamente (Ministerio de Agroindustria, 2017). Tomando en cuenta los últimos 15 años, los rendimientos promedio de los cultivos son de 3236, 3233 y 8357 kg ha⁻¹ para soja, trigo y maíz reflejando un incremento debido a los cambios tecnológicos tal como el mejoramiento genético, el uso de variedades resistentes al glifosato, los fertilizantes, avances en las maquinarias y técnicas de aplicación.

Las variaciones en los rendimientos entre una zona y otra se deben en gran parte a la variabilidad en la oferta de los recursos, principalmente por la distribución de las lluvias y el régimen térmico y también a las diferencias existentes en la capacidad productiva de los suelos (Michelena et al., 1989). Esto sugeriría que existirá una variabilidad de los RP en relación a los RAs dentro de la región descrita, y que las brechas entre RP y RAs y entre RR y RAs se incrementarían en la medida que se avanza hacia el norte de la región. Si bien la variabilidad de los RAs puede inferirse a partir de los rendimientos medios anuales informados para la región, no se han abordado investigaciones acerca de cómo varía el rendimiento potencial y las brechas frente a los cambios en las fechas de siembra.

1.2 Hipótesis

Las hipótesis se encuentran planteadas en cada capítulo de esta tesis

1.3 Objetivo general

Estudiar las variaciones de los rendimientos potenciales (RP), los máximos rendimientos alcanzados en condiciones de secano (RAs), y las brechas de rendimiento entre ellos en distintos genotipos de soja, maíz y trigo en función de la fecha de implantación dentro de la ventana agroclimática disponible a través de experimentos a campo en Oliveros, sur Santa Fe, Argentina.

1.5 Bibliografía

Abbate, P., Cardos, M., y Campaña, L. 2017. El trigo, su difusión, importancia como alimento y consumo. En: Manual del cultivo de trigo. Ed. Divito A. y García F. O. Instituto Internacional de Nutrición de Plantas Programa Latinoamérica Cono Sur (IPNI), Acassuso, Buenos Aires, Argentina. Pp 7-19.

Alvarez, C., Taboada, M., Gutiérrez Boem, F., Bono, A., Fernandez, P., Prystupa, P. 2009. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Science Society of América Journal*, 73: 1242-1250.

Andriani, J. 2000. Crecimiento de las raíces de los principales cultivo extensivos en Argiudoles de Sta. Fe. EAA INTA Oliveros. *Para Mejorar Producción* 13: 40-44.

Andriulo, A., Galantini, J., and Abrego, F. 1996. Exportación y balance edáfico de nutrientes después de 80 años de agricultura continúa. *Actas XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Aguas de Lindoia, Brasil.

Bruinsma, J. 2009. The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? *Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*. Rome. FAO.

Cassman, K. 1999. Ecological intensification of cereal production Systems: Yield potencial, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Volumen 96: 5952-5959.

Castellarín, J., Ferraguti, F. y Rosso, O. 2012. Comportamiento agronómico y calidad comercial de cultivares de trigo pan en la localidad de Oliveros. (Santa Fe). Campaña 2011-12. *Revista Para Mejorar la Producción* Nº 47: 19-26. INTA Oliveros.

Caviglia O., Sadras V. & Andrade, F. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research*, 87: 117-129.

Caviglia, O., Andrade, F. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.

Cirilo, A., Andrade F. 1994. Sowing date and maize productivity I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science*, 34: 1039-1043.

Enrico, J., Conde, M., Martignone, R., Bodrero, L. 2013. Soja: evaluación de la estabilidad del rendimiento según fechas de siembra. *Revista Para Mejorar la Producción* 50: 71-78. INTA Oliveros.

Garcia F. y Salvagiotti, F. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur. Simposio Uso eficiente de nutrientes. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San Jose – Costa Rica.

Garcia, F., Ciampitti, I. y Baigorri, H. 2009. Manual de manejo del cultivo de soja. Ed. Buenos Aires: International Plant Nutrition Institute, 2009. 180 pág.

Garcia F. y Salvagiotti, F. 2010. Fertilizer best management practices in Argentina with emphasis on cropping systems. En: Prochnow L. (Ed) Boas Praticas para uso eficiente de fertilizantes. IPNI – Brazil.

Giorgi, R., Tosolini, R., Sapino, V., Villar, J., León, C., y Chiavassa, A. 2008. Zonificación Agroeconómica de la provincia de Santa Fe. Delimitación y descripción de las zonas y subzonas agroeconómicas. INTA Rafaela Publicación Miscelánea N° 110, 35 pág.

Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Research*, 120: 142-150.

Lobell, D., Cassman, K., Field, C. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes and Causes. *The Annual Review of Environment and Resources*, 34: 179-204.

Magrín, G., Díaz R., Rebella, C.; Del Santo, C., Rodriguez, R. 1991. Simulación del crecimiento y desarrollo de trigo en Argentina y la necesidad de información meteorológica

de entrada. Anales del Sexto Congreso Argentino de Meteorología (Congremet VI) 50 pág. Bs. As, Argentina. Septiembre de 1991.

Menéndez, F. and Satorre E. 2007. Evaluating wheat yield potencial determination in the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*, 95: 1-10.

Mercau, J., Ibarra, M. y Jobbagy, E. 2014. Productividad y consumo de agua de maíz tardío en el centro de San Luis: cambios provocados por la fertilización nitrogenada. *IPNI. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 16: 24-26.

Michelena, R., Irurtia, C., Vavruska, F., Mon, R., Pittaluga, A. 1989. Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana. Publicación Técnica N° 6 INTA. Centros Regionales de Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe. Proyecto de Agricultura Conservacionista.

Micucci, F., Taboada, M. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 86: 152-162.

Ministerio de Agroindustria. 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones.

Monzón, J., Sadras, V., Abbate, P., Caviglia, O. 2007. Modelling Management strategies for wheat-soybean double crops in the Routh-eastern Pampas. *Field Crops Research*, 101: 44-52.

Mosconi, F., Priano, L., Hein, N., Moscatelli, G., Salazar, J., Gutiérrez, T., Cáceres, L. 1981. Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA-MAG 216 pp.

Orgeval, T., Boulanger, J., Capalbo, M., Guevara, E., Meira, S. y Penalba, O. 2010. Yield estimation and sowing date optimization based on seasonal climate information in the three CLARIS sites. *Climate Change*, 98: 565-580.

Otegui, M., Ruiz, R., Petruzzi, D. 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Research* 47: 167-174.

Otegui, M. y López Pereira, M. 2003. Fecha de siembra. En Satorre, E., Benech, R., Slafer, G., de la Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M. y Savin, R. Producción de Granos. Bases Funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía. U.B.A. Argentina. 250-275.

Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Laurila, I. 2009. Cereal Yield trends in northern European conditions: Changes in yield potential and its realization. *Field Crops Research* 110: 85-90.

Pengue, W.A. 2005. Transgenic Crops in Argentina: The Ecological and Social Debt. *Bulletin of Science, Technology & Society* 25: 314-322.

Ruiz, R. Satorre, E., Calderini, D., Miralles, D. 1998. Simulación del comportamiento del cultivo de trigo en el Sur de Córdoba usando el modelo CERES-Wheat. *Actas IV Congreso Nacional de Trigo*, 53-54.

Salvagiotti, F., Rotundo, J., Di Mauro, G., Condorí, A., Gallo, S., Pozzi, R. y Boxler, M. 2016. Rendimientos potenciales y brechas de rendimiento de soja en la campaña 2014-15. *Para Mejorar la Producción* N° 54, EEA INTA Oliveros: 129-136.

Salvagiotti, F. 2010. Manejo de soja de alta producción. *Para Mejorar la Producción* N° 42. EEA INTA Oliveros 57-62.

Salvagiotti, F. 2009. Rendimientos potenciales en Maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. *Para Mejorar la Producción* N° 41, EEA INTA Oliveros: 61-66.

Salvagiotti, F., Castellarín, J. Pedrol, H y Satorre, E. 2003. Utilización del modelo de simulación CERES-Trigo como herramienta en el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo. *Para Mejorar la producción* N° 23 EEA INTA Oliveros.

Sasal, M., Andriulo, A., Taboada, M. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research* 87: 9-18.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2008. El avance de la frontera agropecuaria y sus consecuencias.

Specht, J., Bastidas, A., Salvagiotti, F., Setiyono, T., Liska, A., Dobermann, A., Walters, D., and Cassman, K. 2006. Soybean Yield Potential and Management Practices Required to Achieve It. Murphy, L. S. Proceedings of the 2006 Fluid Fertilizer Forum. Manhattan, KS. Fluid Fertilizer Foundation.

Van Ittersum, M.K., Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52: 197-208.

Wei-li, L., Peter, C., Gui-yan, W., Run-hai, L., Hong-zhan, L., Ai-ping, X. 2011. Quantifying the yield gap in wheat-maize cropping systems of the Hebei Plain, China. *Field Crops Research*, 124: 180-185.

Zhang, Q., Gao, Q., Herbert, S., Li, Y. and Hashami, A. 2010. Influence of sowing date on phenological stages, seed growth and marketable yield of four vegetable soybean cultivars in North-eastern USA. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 5(18), pp. 2556-2562.

Zhang, N., Du, X., Jiang, D., Cui, Y. 2009. Effect of sowing date on growth and yield of summer corn (*Zea mays*.L). *Journal Agriculture. University of Hebei*, 32 (5), 7–11.

CAPITULO 2

ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN SOJA EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DEL GENOTIPO

2.1 Introducción

El cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr) tiene ciertas características que pueden limitar la expresión del rendimiento potencial. Este cultivo posee un metabolismo C3, la fase reproductiva es inducida por días cortos y la composición de la semilla es de ca. 40% de proteína y un 20% de aceite (Cuniberti et al., 2011). Como todo cultivo, los factores climáticos, tales como la temperatura, el fotoperiodo, la radiación incidente, la disponibilidad de agua y nutrientes regularan los procesos fisiológicos, el crecimiento y desarrollo del cultivo y en consecuencia en la producción de granos (Board et., 1984; Egli and Bruening, 2000; Cooper, 2003).

Los incrementos del rendimiento potencial en soja se deben fundamentalmente a los aportes del mejoramiento genético y a la introducción de tecnologías en el manejo del cultivo. En USA, Specht & Williams (1984) mediante un análisis de regresión compararon los cultivares de origen asiático (denominados obsoletos) con las nuevas variedades de soja, y mostraron un incremento del rendimiento a una tasa anual de 18,8 kg ha⁻¹ año debido al mejoramiento genético, representando el 80% de la ganancia en el rendimiento en un período de 75 años (1902-1977). Sin embargo, el crecimiento en la tasa no fue continuo en el periodo evaluado, ya que se produjo un aumento de un 40 % acelerado por la adopción de nuevas tecnologías de manejo agronómico. Posteriormente el mismo autor y colaboradores establecieron una ganancia genética en el cultivo de soja de 29 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Specht et al., 2014).

En Argentina se evaluaron 181 cultivares de los grupos de madurez (GMs) III a V liberados entre 1980 y 2015, estos mostraron una ganancia genética promedio de 43 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1,1% año⁻¹), sin una clara diferencia entre GMs (de Felipe et al., 2015). Previamente Santos y col. (2006) estimaron una tasa promedio de 14,3 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,5 % año⁻¹) en cultivares de los GMs III a VIII durante el periodo 1982-2000, provenientes de una red de ensayos multiambientales. En cuanto al rendimiento potencial en soja Specht et al., (1999) estimaron un rendimiento potencial en soja de 8.000 kg ha⁻¹ en Estados Unidos. En ensayos de campo (New Jersey), Flannery (1983) registró rendimientos de hasta 7.911 kg ha⁻¹ en

experimentos conducidos en ausencia de limitantes de agua. En Ohio, experimentos realizados a largo plazo en sistemas de alta producción obtuvieron rendimientos máximos entre 6.050 y 6.710 kg ha⁻¹ (Cooper, 1985; 1989). En Australia, Lawn et al., (1984) observaron que el máximo rendimiento alcanzable fue de 8.604 kg ha⁻¹. Por otra parte, datos provenientes de concursos de rendimiento, i.e. productores que minimizan los factores limitantes del rendimiento tales como la provisión de agua, fertilización, control de plagas y enfermedades, lograron obtener hasta 7.310 kg ha⁻¹ (Cooper et al., 2003). Si bien hay registros de concursos de rendimiento en USA que lograron entre 11.000 y 15.000 kg ha⁻¹, estos resultados fueron muy cuestionados.

Otra metodología para el estudio de rendimientos potenciales y brechas de producción es el uso de modelos de simulación. Van Iterssum et al., 2013 mostraron que esta es una de las formas más precisas de estimar brechas de producción para un área determinada, reflejando las variaciones temporales y espaciales de la producción. Usando esta metodología, en Nebraska, Grassini y col., (2015a) estimaron que el rendimiento de soja en campos de productores con sistema de riego representó un 84 % del rendimiento potencial. En India, Bathia et al., 2008 estimaron un rendimiento potencial de 3.020 kg ha⁻¹ versus 2.170 kg ha⁻¹ (rendimiento limitado por agua) lo cual representa una brecha de rendimiento del 28 % en la disminución del rendimiento por condiciones adversas.

En Argentina desde los años 80 a la actualidad la soja comenzó a aumentar su producción a una tasa anual de 30 kg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2014). En la campaña 2015/16, el rendimiento promedio nacional de soja fue de 2.795 kg ha⁻¹, y en la provincia de Santa Fe fue de 2.400 kg ha⁻¹ (Ministerio Agroindustria, 2017), con rangos muy variables de producción. El primer Atlas Mundial de brechas de rendimiento (www.yieldgap.org) se creó con el objetivo de estimar el rendimiento potencial y las brechas de rendimiento a gran escala (Grassini et al., 2015b; Bussel et al., 2015, <http://www.yieldgap.org>). Para la zona núcleo de Argentina se estimó un rendimiento potencial en el cultivo de soja de entre 6,5 y 7 tn ha⁻¹ y la brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento actual de 25-35%, las simulaciones se realizaron durante el mes de noviembre considerado como el período óptimo de siembra (Aramburu Merlos, 2015). Es importante destacar que en una región determinada existirá un rango de brechas de producción y máximos rendimientos alcanzables, el cual estará determinado por la ventana agroclimática (i.e. oferta de recursos del ambiente) (Lobell et al., 2009) que definirá distintas estrategias de manejo.

En el caso de la soja como así también de otros cultivos de verano esta ventana está determinada por el periodo libre de heladas, que en la región pampeana comienza a

principios de septiembre y finaliza a mediados de mayo, la oferta promedio de radiación acumulada desde octubre a marzo es de 3.880 Mj m⁻² y el régimen de lluvias es de 600 a 1.400 mm (Hall et al., 1992). Entonces durante este período de tiempo antes mencionado se podrán planificar diferentes estrategias de manejo mediante la combinación de cultivares de distintos ciclos, épocas de siembras contrastantes y otros factores de manejo. Esto determinará una oferta de recursos ambientales distintas (variaciones en el fotoperíodo, en la temperatura y en la distribución y cantidad de lluvias), tratando de que coincidan con los periodos críticos de determinación del rendimiento del cultivo (Bacigaluppo et al., 2011).

La etapa crítica para la determinación del rendimiento en la soja es durante la fijación de granos (Board et al., 1995; Jiang y Egli, 1993, Egli, 2010), es decir desde floración (R1) hasta cuando la semilla alcanza su máximo tamaño (R6) (Egli, 1997). En consecuencia las posibilidades de alcanzar los máximos rendimientos serán mayores, (Salvagiotti, 2010), afectándose de diferente manera los componentes numéricos del rendimiento.

Hipótesis

Bajo las condiciones agroecológicas del centro-sur de Santa Fe se hipotetiza que:

1a) el rendimiento potencial en el cultivo de soja es más alto en fechas de siembras tempranas cuando se combinan con grupos de madurez cortos respecto de fechas de siembras intermedias o tardías debido a una mayor oferta de radiación solar y agua.

1b) las brechas entre el rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable en el cultivo de soja en secano son menores en las fechas de siembras tempranas respecto de fechas de siembra intermedias o tardías.

1c) el número de vainas de soja por unidad de superficie es el componente numérico que mejor explica estas brechas.

Objetivos Específicos

Evaluar las variaciones de los rendimientos potenciales (RP) y los máximos rendimientos alcanzados en condiciones de secano (RAs) y la brecha de rendimiento entre

ellos en el cultivo de soja en siembras contrastantes para diferentes genotipos en experimentos a campo.

Analizar los cambios en los principales componentes numéricos que expliquen las brechas de rendimiento.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1. Sitio experimental, diseño y manejo

Se realizaron dos experimentos en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros, Santa Fe (32°33'S-60°51'W) durante los años 2009-2010 y 2011-2012. El suelo fue un Argiudol Típico serie Maciel, con más de 40 años de historia agrícola. Se evaluaron tres cultivares (cu) de hábito de crecimiento indeterminado de alto potencial de rendimiento (Bacigaluppo et al., 2009; Enrico et al., 2009) pertenecientes a los grupos de madurez (GMs) III largo (NA 3731 RG), IV largo (DM 4670 RR) y V corto (DM 5.5i RR) en tres fechas de siembras: temprana (Fs Te), intermedia (Fs I) y tardía (Fs Ta) (Tabla 2.1). Estos cultivares son sembrados en la zona normalmente en la última quincena de noviembre, esta fecha se toma como de primera u óptima, en tanto que sembrados en diciembre (desde la primer semana hasta el 20) representan las fechas de siembras tardías (RECSO, 2015). Cada combinación cultivar por fecha de siembra fue analizada bajo riego (R) y en seco (S). En ambos años de investigación el cultivo antecesor en las tres fechas de siembra fue soja de primera y luego un barbecho largo.

Las parcelas se sembraron en siembra directa a 0,52 m de distancia entre líneas, con una densidad de siembra de 19, 23 y 27 semillas por metro lineal en la Fs Te, I y Ta, respectivamente. El tamaño de cada unidad experimental fue de 52 m² (2,6 m ancho por 20 m largo). A la siembra, se fertilizó con 18 kg ha⁻¹ de fósforo (80 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico en el 2009 y con 90 kg ha⁻¹ de superfosfato triple en el 2011).

La humedad inicial del perfil de suelo hasta los dos metros de profundidad (las mediciones se realizaron por gravimetría) para las Fs Te, I y Ta del 2009-2010 fueron de 201, 218 y 296 mm representando un 67, 72 y 98 % de agua útil disponible para el cultivo. Para el 2011-2012, el contenido inicial de agua fue de 243 mm en la Fs Te, 262 mm en la Fs I y 279 mm en la Fs Ta, con lo cual esto representó un 81, 87 y 93 % de agua que disponía el cultivo al momento de la siembra.

El tratamiento que se condujo bajo riego se realizó a través del uso de un sistema de riego por goteo. El mismo consistió en mangueras que ocuparon el largo de la parcela (20 m) dispuestas cada dos surcos y con los goteros distribuidos cada 0,3 m de distancia, con un caudal teórico de 3,3 mm h⁻¹. Los riegos se aplicaron en función de los datos provenientes de la sonda de neutrones y teniendo en cuenta la frecuencia de las precipitaciones con el objetivo de mantener la humedad del suelo por encima del 60 % de agua útil. Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. Durante el ciclo el cultivo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades.

Tabla 2.1 – Fechas de siembra del cultivo de soja en la EEA Oliveros. Años 2009-2010 y 2011-2012.

Fecha de Siembra	Año 2009-2010	Año 2010-2011
Te	26-10-2009	01-11-2011
I	24-11-2009	25-11-2011
Ta	08-01-2010	27-12-2011

2.2.2. Muestreos y Determinaciones en planta

Se registró el estado fenológico del cultivo semanalmente sobre una muestra de 20 plantas al azar determinándose la emergencia (E), inicio de floración (R1), comienzo de formación de vainas (R3), inicio de llenado de granos (R5) y madurez fisiológica (R7) (Fehr & Caviness, 1977).

En madurez fisiológica, se determinó la biomasa aérea total en una muestra de 0,5 m² de superficie. De esa muestra se tomó una alícuota de diez plantas, en gabinete se determinó el peso fresco y posteriormente se separaron las diferentes estructuras: hojas, tallos, vainas y semillas. Las mismas fueron llevadas a estufa a 60° C hasta peso constante. Además en cada submuestra se determinó el número de nudos fértiles en tallo principal, el número de nudos fértiles totales por planta y el número de vainas por metro cuadrado. Se calculó el índice de cosecha (a partir del cociente entre el peso seco de las semillas y el total de biomasa aérea en R7).

En madurez de cosecha (R8), se determinó el rendimiento en semilla con cosechadora experimental en una superficie de 5 m², el cual fue ajustado al 13% de

humedad. Se determinó el peso individual del grano a partir de una muestra de 200 semillas. Con esta información se calculó el número de granos por metro cuadrado.

Para cada fecha de siembra se calcularon las brechas de rendimiento y de sus componentes numéricos determinados por la diferencia entre el rendimiento potencial (RP: tratamiento con riego) y el rendimiento limitado por agua (RAs).

2.2.3. Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad diaria de agua en el suelo se calculó mediante el software Balance Hídrico de Cultivos Extensivos (BAHICU versión 1,02) en el cultivar del GM IV (DM 4670 RR) en las tres fechas de siembra. Este programa realiza un balance de agua en el suelo y permite observar la evolución del contenido de agua útil disponible para el cultivo en el perfil explorado por las raíces hasta los dos metros profundidad. Los datos de entrada para utilizar el modelo fueron: la humedad del perfil previo a la siembra, la evapotranspiración potencial (ETP) diaria según Penman Monteith, las precipitaciones diarias y las láminas de riego aplicadas en cada uno de los experimentos evaluados. A partir de estos datos de entrada se realizaron los gráficos del balance de agua para cada época de siembra. En estos gráficos se presentan las curvas de máxima capacidad de agua disponible (CC) en el suelo explorado por las raíces del cultivo, la curva del 50% de agua útil considerada como el límite de estrés hídrico (L. Str) para ese volumen de suelo y el agua útil existente (AUE) que indica la disponibilidad diaria de agua en el suelo para el cultivo.

2.2.4. Registros de Variables Agro-meteorológicas

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la Estación Agrometeorológica perteneciente a la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros. Para un mejor análisis de los datos se dividió el ciclo del cultivo en tres subperiodos i) E-R1: corresponde a la etapa vegetativa del cultivo, desde emergencia hasta floración; ii) R1-R5: subperiodo desde floración hasta comienzo de llenado de semilla, en esta etapa es donde el cultivo define principalmente el número de semillas y iii) R5-R7: tercer subperiodo desde comienzo de llenado de semilla hasta madurez fisiológica, etapa donde define el peso individual de las semillas (Kantolic et al., 2003). En los tres subperiodos se realizó el cálculo del fotoperiodo, las temperaturas máximas y mínimas y el promedio histórico correspondiente para cada subperiodo analizado. Además se calculó en cada año, por fecha de siembra y por cultivar el promedio y los cuartiles 25 y 75 de las precipitaciones acumuladas y de la

radiación solar incidente acumulada de la serie histórica de 40 años de la Estación Agro-meteorológica (1971 - 2011).

2.2.5. Análisis Estadístico

Las variables meteorológicas (temperatura y fotoperiodo) y la fenología se analizaron en forma descriptiva.

Los datos correspondientes a rendimiento y sus componentes fueron analizados mediante un análisis de la varianza (ANAVA) utilizando el procedimiento Proc Mixed (Littel, 1996) del sistema estadístico SAS considerando como efectos fijos: año, fecha de siembra, genotipo y disponibilidad hídrica mientras que a la repetición/bloque se consideraron como efecto aleatorio. Se analizaron las interacciones, en el caso de las interacciones de orden n si no eran significativas se procedió a analizar al nivel n-1 y así sucesivamente. Cuando las diferencias de medias eran significativas en el ANAVA, se les aplicaban el test de diferencias mínimas significativas (DMS) con un nivel de significancia de un 5%.

2.3 Resultados

2.3.1 Fenología

Se observó que los subperíodos disminuyeron el número de días de cada evento conforme el fotoperiodo se fue acortando hacia las fechas tardías (Tabla 2.2). La Fs Te tuvo un fotoperiodo promedio de 14,7 hs, la Fs I 14, 3 y la Fs Ta 13,8 hs, con lo cual esta última fecha presentó una reducción de un 7 y un 6 % respecto a las dos primeras siembras (ANEXO I). Comparando los dos años analizados, la duración total del ciclo de los distintos cultivares (i.e. E-R7) fueron similares en la Fs Te, de tal manera que NA 3731 RG tuvo una duración de 110 vs. 109 días, DM 4670 RR 120 vs 116 días y DM 5,5i, 130 vs. 127 días en el 2009-2010 y 2011-2012 respectivamente. En las Fs I y Ta hubo una mayor variación en el ciclo entre los dos años para los cultivares de GM IV y V. El cultivar con mayor sensibilidad a la variación en la fecha de siembra fue DM 5,5i (Tabla 2.2), donde se observó que el subperiodo E-R1 se extendió unos 18 días más en la Fs Te del primer año respecto del segundo año de evaluación, mientras que en el subperiodo R1-R5 de la misma Fs prolongó unos 20 días más en el 2011-2012 que en el 2009-2010. En cuanto al período de llenado de grano DM5.5i acortó entre 8 días y 11 días en la Fs Te de ambos años respecto a los otros dos cultivares. La menor duración en días de este subperiodo (R5-R7) se dio en la Fs Ta del

2011-2012 donde este cultivar acortó entre 7 y 12 días respecto a DM 4670 RR y NA 3731 RG.

Tabla 2.2. Duración de las etapas (días) en el cultivo de soja por subperiodo: E-R1, R1-R5 y R5-R7 según fecha de siembra y cultivar. Años 2009-2010 y 2011-2012.

Cu	Días	Fecha Sbra	2009-2010				2011-2012			
			E-R1	R1-R5	R5-R7	E-R7	E-R1	R1-R5	R5-R7	E-R7
NA 3731 RG	Te		25	39	46	110	26	39	44	109
	I		35	25	40	100	37	20	47	104
	Ta		25	21	38	84	27	17	45	89
DM 4670 RR	Te		25	49	46	120	26	46	44	116
	I		35	29	41	105	38	21	53	112
	Ta		26	22	43	91	36	21	40	97
DM 5,5i	Te		46	46	38	130	28	66	33	127
	I		49	29	35	113	55	22	45	122
	Ta		37	19	38	94	46	20	33	108

2.3.2 Disponibilidad de Recursos

2.3.2.1. Disponibilidad de agua. Precipitaciones

En el 2009-2010, la cantidad de lluvias recibidas desde mediados de octubre hasta fines de marzo del 2010 fue de 798 mm, en tanto que para el mismo período del 2011-2012 el total de lluvias fue de 648 mm; concentrando la mayor cantidad de agua en los meses de octubre a diciembre del primer año acumulando el 60 % del agua de lluvia y en el segundo año se concentraron en los meses de enero a marzo 2012 donde acumularon un 73 %.

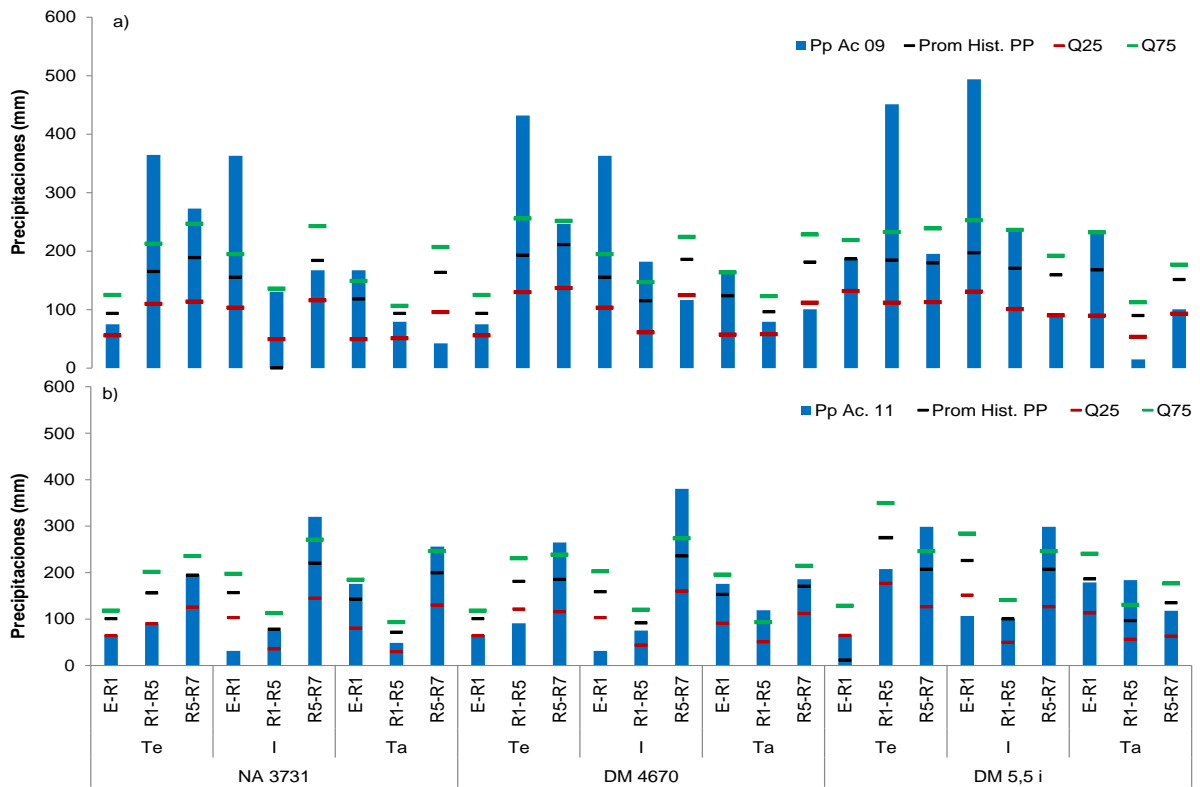


Figura 2.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperíodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 para tres cultivares de soja en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2011-2012 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Durante la etapa E-R1, el primer año llovió en promedio un 13 %, un 61 % y un 7 % más en las Fs Te, I y Ta que en el segundo año de estudio de esta tesis.

En la Figura 2.1a se observa que en 2009-2010 durante el subperíodo crítico de determinación del número de frutos (R1-R5) de la Fs Te las precipitaciones de los tres cultivares superaron el promedio histórico en más de un 50 % y de un 43 % al cuartil 75. El promedio acumulado de lluvias de este subperíodo fue un 69 % superior al 2011-2012 (Figura 2.1b). El cultivar DM 5,5i fue quien obtuvo una mayor oferta de lluvias durante el subperíodo R1-R5 del 2009-2010 en las Fs I y Ta (en promedio: 47,5 y 38,5 mm, Figura 2.1a). En tanto que en el segundo año este mismo cultivar para el mismo subperíodo tuvo un 70% más de lluvias en la Fs Te, un 26 % más en la Fs I y un 38 % en la Fs Ta respecto de los otros dos cultivares (Figura 2.1b).

Durante el subperíodo de llenado de granos (R5-R7) la Fs Te del 2009-2010 superó en un 20 y un 40% en la cantidad de lluvias a las Fs I y Ta. Mientras que en el 2011-2012 la Fs I tuvo un mayor aporte de precipitaciones que las Fs Te y Ta (26 y 34 %).

2.3.2.2. Oferta de Radiación

La oferta de radiación solar desde mediados de octubre a fines de marzo fue mayor en el segundo año de evaluación de la tesis (3.966 Mj m^{-2}) respecto al primero (3728 Mj m^{-2}). En la Fs Te e I del 2009-2010 la radiación incidente total durante el ciclo del cultivo (E-R7) fue un 10 y un 14 % menor al promedio histórico de la radiación acumulada (2550 y 2219 Mj m^{-2}). En 2011-2012, la radiación solar acumulada dentro de este subperiodo para las Fs I y Ta superaron al promedio histórico (2233 y 1747 Mj m^{-2}) en un 3 y un 4 %, y en un 2 y 1 % en promedio respecto al cuartil 75 (Figura 2.2a y b).

Durante el período vegetativo (E-R1) del 2009-2010, el cultivo tuvo una mayor oferta de radiación en la Fs I (803 Mj m^{-2}) respecto a las Fs Te y Ta (653 y 652 Mj m^{-2}) pero ninguna de las tres fechas de siembra superaron al promedio histórico de 40 años (749 Mj m^{-2} Te 1.172 Mj m^{-2} I y 690 Ta Mj m^{-2}). En 2011-2012 la Fs I fue la que mayor incidencia de radiación acumulada tuvo (1.090 Mj m^{-2}) frente a las Fs Te e I (671 y 925 Mj m^{-2} , respectivamente) superando además en un 6 % al promedio histórico (1.030 Mj m^{-2}).

En el subperiodo reproductivo de inicio de floración a llenado de granos (R1-R5) de la Fs Te del 2009-2010 el rango de variación entre las variedades fue desde 757 a 987 Mj m^{-2} . Para la Fs I la cantidad de radiación incidente acumulada en el mismo subperiodo por las tres variedades fue similar (639 Mj m^{-2} , Figura 2a). En el 2011-2012, en la Fs Te la variedad DM 5.5i obtuvo el mayor valor de radiación incidente acumulada (1.557 Mj m^{-2}) respecto de NA 3731 RG (946 Mj m^{-2}) y DM 4670 RR (1.127 Mj m^{-2} , Figura 2.2b).

El subperiodo R5-R7 para la Fs Te del 2009-2010 fue la que tuvo los mayores valores acumulados de radiación respecto a las Fs I y Ta (994 , 1.203 y 769 Mj m^{-2} en los GMs III, IV y V respectivamente) sin embargo no superó al promedio histórico y al percentil 75. En las Fs I y Ta de la misma campaña, DM 4670 RR acumuló una mayor radiación incidente (833 y 751 Mj m^{-2}) respecto a NA 3731 RG (798 y 699 Mj m^{-2}) y DM 5.5i (702 y 630 Mj m^{-2} , Figura 2.2a). En 2011-2012, para el mismo subperiodo en la Fs Te la radiación solar superó en un 32 % a las Fs I y Ta. En la Fs I DM 5.5i acumuló un 22 y un 28 % más de radiación que NA 3731 RG y DM 4670 RR, mientras que en la Fs Ta fue NA 3731 RG quién capturó un 14 y un 29 % más de radiación que DM 4670 RR y DM 5.5i y superó al promedio histórico en un 7% y al cuartil 75 en un 3 % (Figura 2.2b).

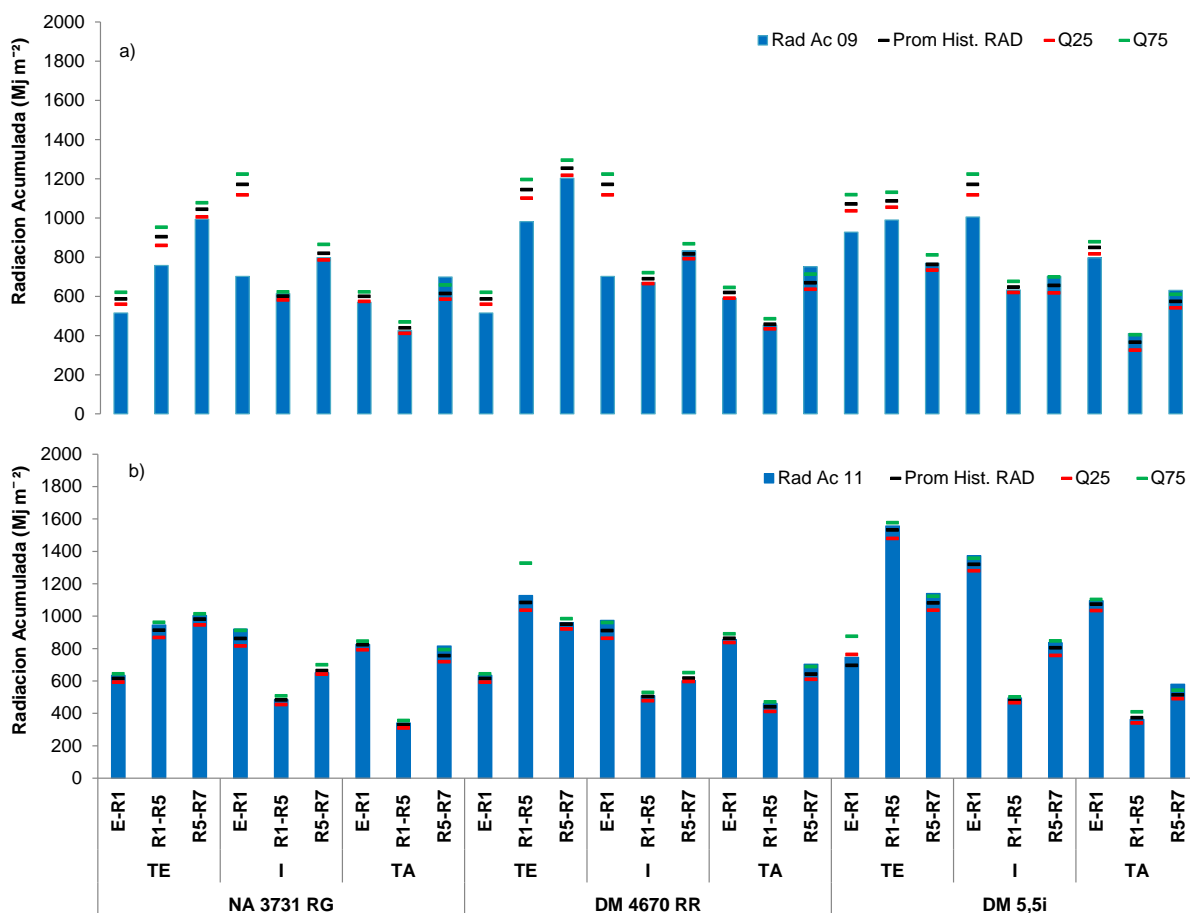


Figura 2.2. Radiación solar acumulada (Mj m^{-2}) durante los subperíodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 para tres cultivares de soja en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2011-2012 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

2.3.2.3. Temperatura

En el año 2011-12, la temperatura máxima correspondiente a los 3 subperíodos evaluados (E-R1, R1-R5 y R5-R7) fue de 1, 1,4 y 0,4 °C mayor en las Fs Te, I y Ta de este año respecto del 2009-2010 (Tabla 2.3). Los picos de máxima temperatura ocurrieron en el subperíodo R1-R5 para las Fs Te, I y Ta alcanzando a 32, 33, 31°C en el 2011-2012 y 29, 32 y 30°C en el 2009-2010. Respecto a las temperaturas mínimas para el 2011-2012 fueron en general inferiores al 2009-2010 en un promedio de 1°C para cada fecha de siembra.

Tabla 2.3. Temperatura Máxima (T°C Máx), Temperatura Mínima (T°C Mín) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx- T Hist. Mín), en los subperiodos E-R1, R1-R5 y R5-R7 en tres cultivares de soja y tres fechas de siembra. Años 2009-2010 y 2011-2012.

CU	Fecha Sbra.	Subperiodos	T°C Max 2009-2010	T°C Max 2011-2012	T°C Hist. Max	T°C Mín 2009-2010	T°C Mín 2011-2012	T°C Hist. M{in
NA 3731 RG	Te	E-R1	28,7	28,6	28,0	17,9	15,6	15,1
		R1-R5	28,0	32,0	32,1	18,4	17,2	17,2
		R5-R7	31,4	30,8	31,8	20,2	18,8	19,2
	I	E-R1	27,8	31,7	30,0	18,3	16,6	17,5
		R1-R5	32,0	33,7	33,9	18,4	19,2	14,9
		R5-R7	30,5	30,0	30,2	20,3	18,7	18,8
	Ta	E-R1	32,1	33,3	31,0	20,6	19,4	18,2
		R1-R5	30,0	30,0	30,3	19,6	18,7	19,0
		R5-R7	29,3	28,6	28,6	15,9	15,7	15,8
DM 4670 RR	Te	E-R1	28,5	28,6	28,0	19,7	15,6	15,1
		R1-R5	28,5	32,6	32,6	18,2	17,6	17,6
		R5-R7	31	30,3	30,7	20,2	18,4	18,8
	I	E-R1	27,8	32,0	31,7	18,3	16,8	17,5
		R1-R5	31,7	33,7	34,0	19,1	19,3	19,5
		R5-R7	30,4	29,6	29,6	19,2	18,1	18,2
	Ta	E-R1	32	32,9	31,0	20,0	19,4	18,2
		R1-R5	29,9	29,4	29,3	19,4	17,8	17,9
		R5-R7	28,5	29,0	28,9	15,4	15,7	15,7
DM 5,5i	Te	E-R1	27,1	28,8	27,7	17,4	15,6	15,2
		R1-R5	31	32,0	32,2	19,6	18,0	18,0
		R5-R7	30,5	30,2	30,0	19,6	19,0	19,0
	I	E-R1	28,6	32,4	29,6	18,2	17,5	17,8
		R1-R5	31,9	31,7	31,7	21,0	19,3	19,2
		R5-R7	30,2	28,4	28,4	17,7	16,5	16,5
	Ta	E-R1	31,9	32,9	31,0	20,7	19,4	18,0
		R1-R5	30,1	30,8	28,9	17,3	17,9	18,2
		R5-R7	27,9	27,5	28,1	15,0	14,6	14,7

2.3.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo

El contenido de humedad en el suelo en el primer año (2009-2010) y en la Fs Te partió con un nivel adecuado de humedad (67 %) y se mantuvo siempre cercano a capacidad de campo (CC), para el tratamiento en secano. Esto se cumplió en gran parte del ciclo del cultivo sobre todo en el período crítico del mismo debido al aporte de las precipitaciones que fueron frecuentes desde fines de noviembre 2009 a marzo del 2010 (Figura 2.3).

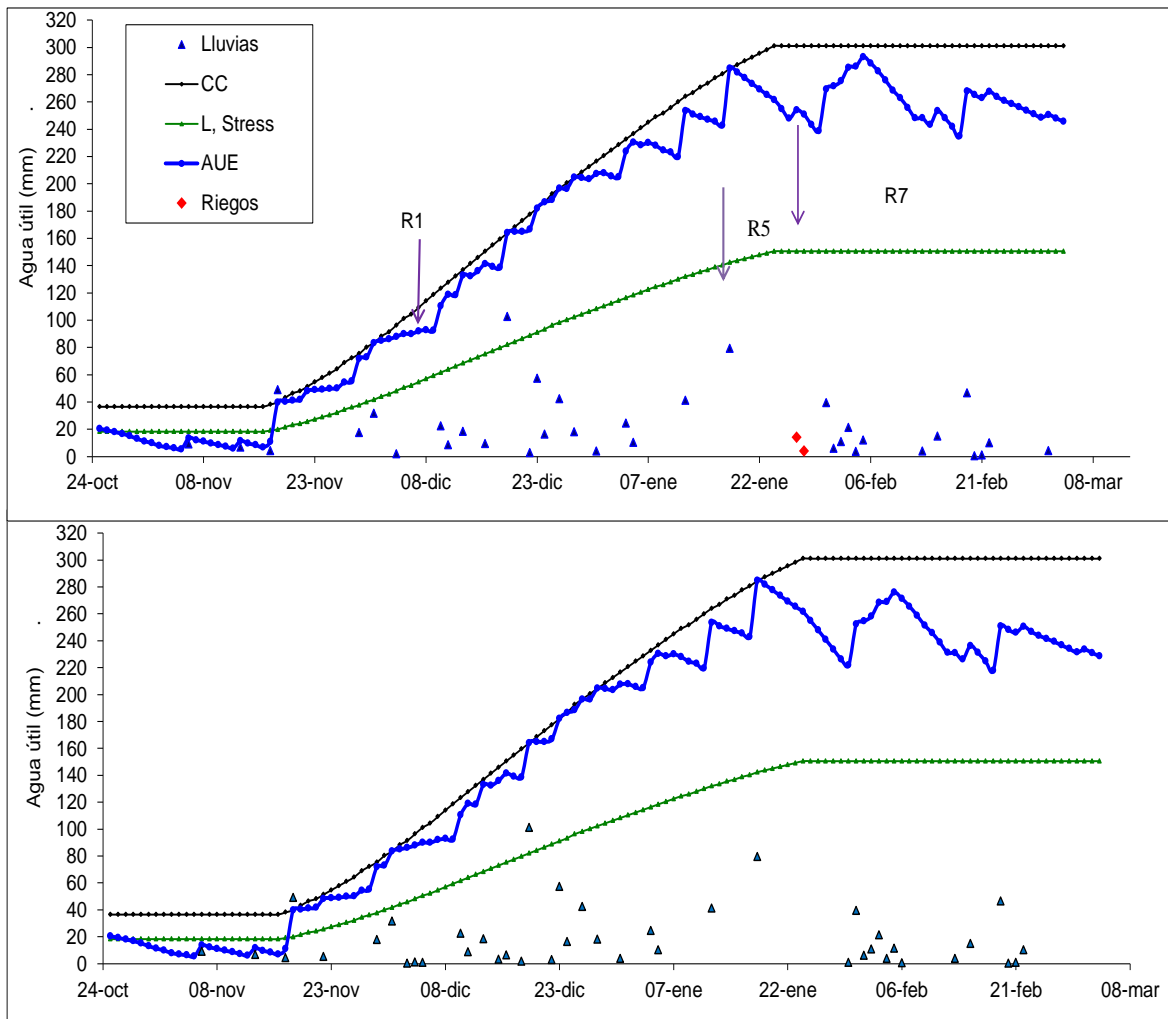


Figura 2.3. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha siembra temprana (Te) con riego (R, arriba) y en seco (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

Para la Fs I del mismo año, el agua inicial al momento de la siembra se mantuvo en niveles adecuados como en la Fs Te. El AUE para el cultivo se mantuvo cercano a la CC durante toda la etapa reproductiva (R1-R7), sin embargo en el tratamiento en seco el cultivo atravesó un estrés hídrico en la etapa final del llenado de granos (Figura 2.4). Y en la Fs Ta el tratamiento en seco estuvo cercano al límite de estrés (L. Str.) a partir de llenado de grano (R5) hasta la finalización del ciclo (Figura 2.5).

El tratamiento en seco del segundo año (2011-2012) en la Fs Te, el cultivo estuvo con estrés hídrico desde floración en adelante y se mantuvo por debajo de la curva L. Str. (Figura 2.6).

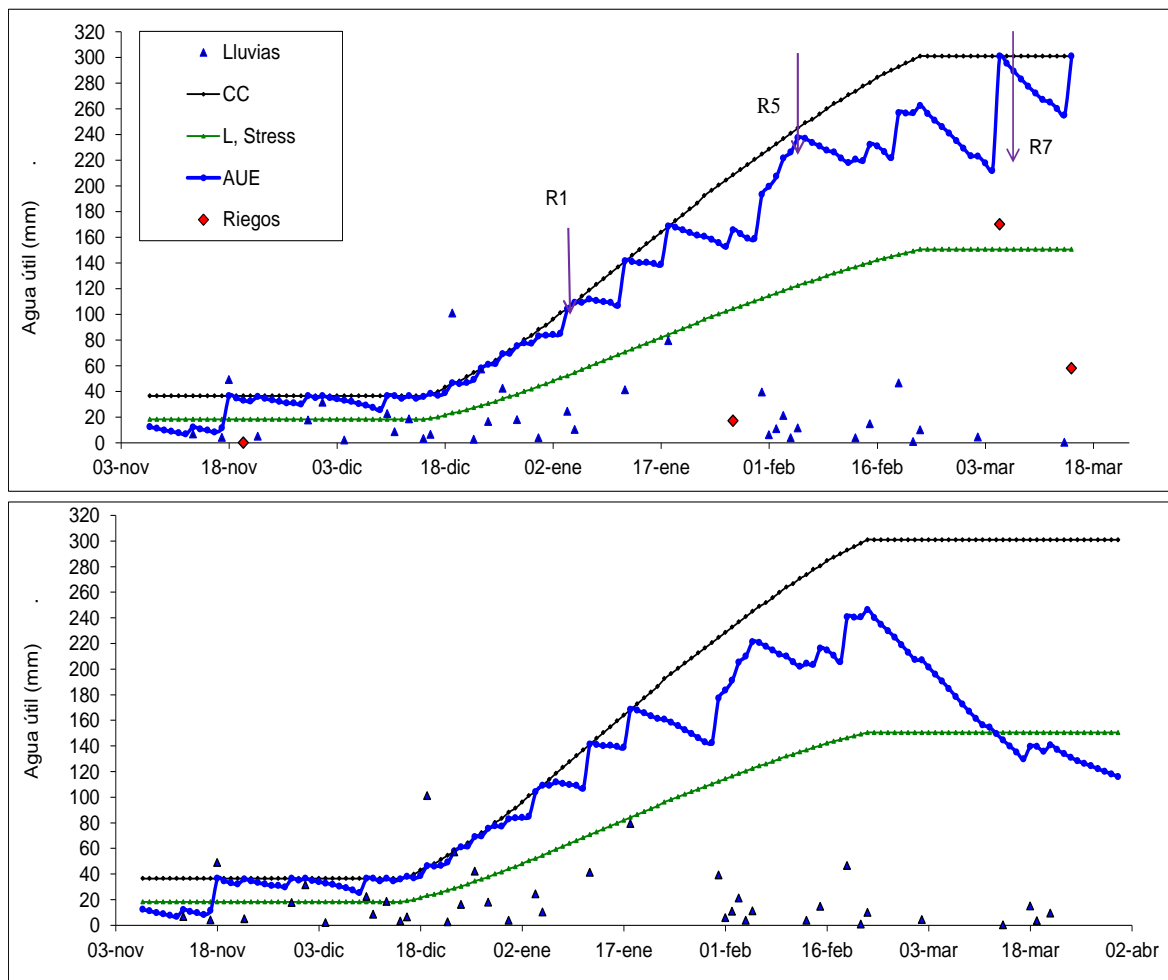


Figura 2.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra intermedia (I) con riego (R, arriba) y en seco (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

Para la Fs I se observó la misma tendencia de la Fs Te, aunque las precipitaciones ocurridas en esta época fueron de mayor cantidad (60-80 mm). Sin embargo el tratamiento en seco no logró superar la curva del límite de estrés hídrico (Figura 2.7).

En la Fs Ta del 2011-2012, el cultivo bajo riego atravesó un estrés hídrico durante la etapa vegetativa por problemas de operatividad en la aplicación del riego por goteo, sin embargo no es de esperarse que en esta etapa temprana afecte el rendimiento (Andriani y Bodrero, 1997). A partir de febrero coincidiendo con la etapa reproductiva comenzó a disponer de agua hasta llegar a R7 aproximadamente debido a las frecuentes lluvias (tratamiento en seco, Figura 2.8).

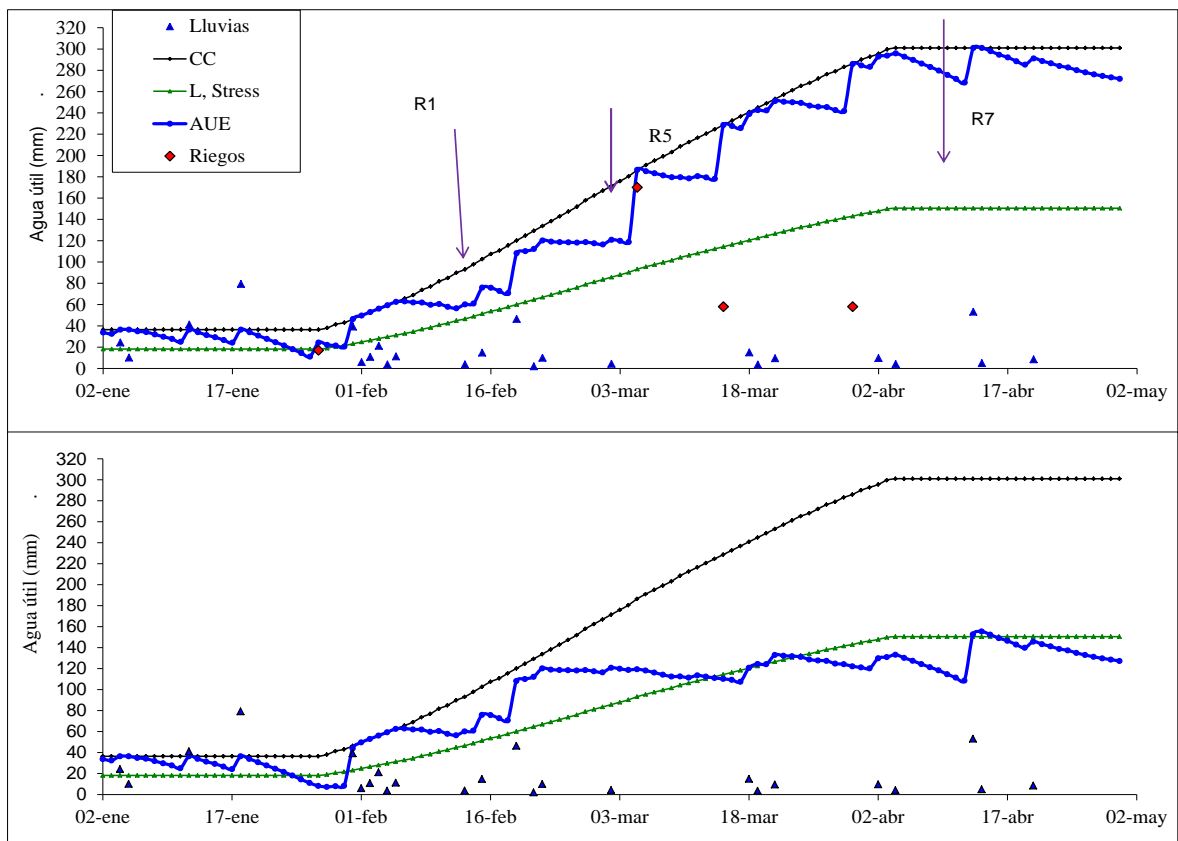


Figura 2.5. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha siembra tardía (Ta) con riego (R, arriba) y en seco (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2009-2010.

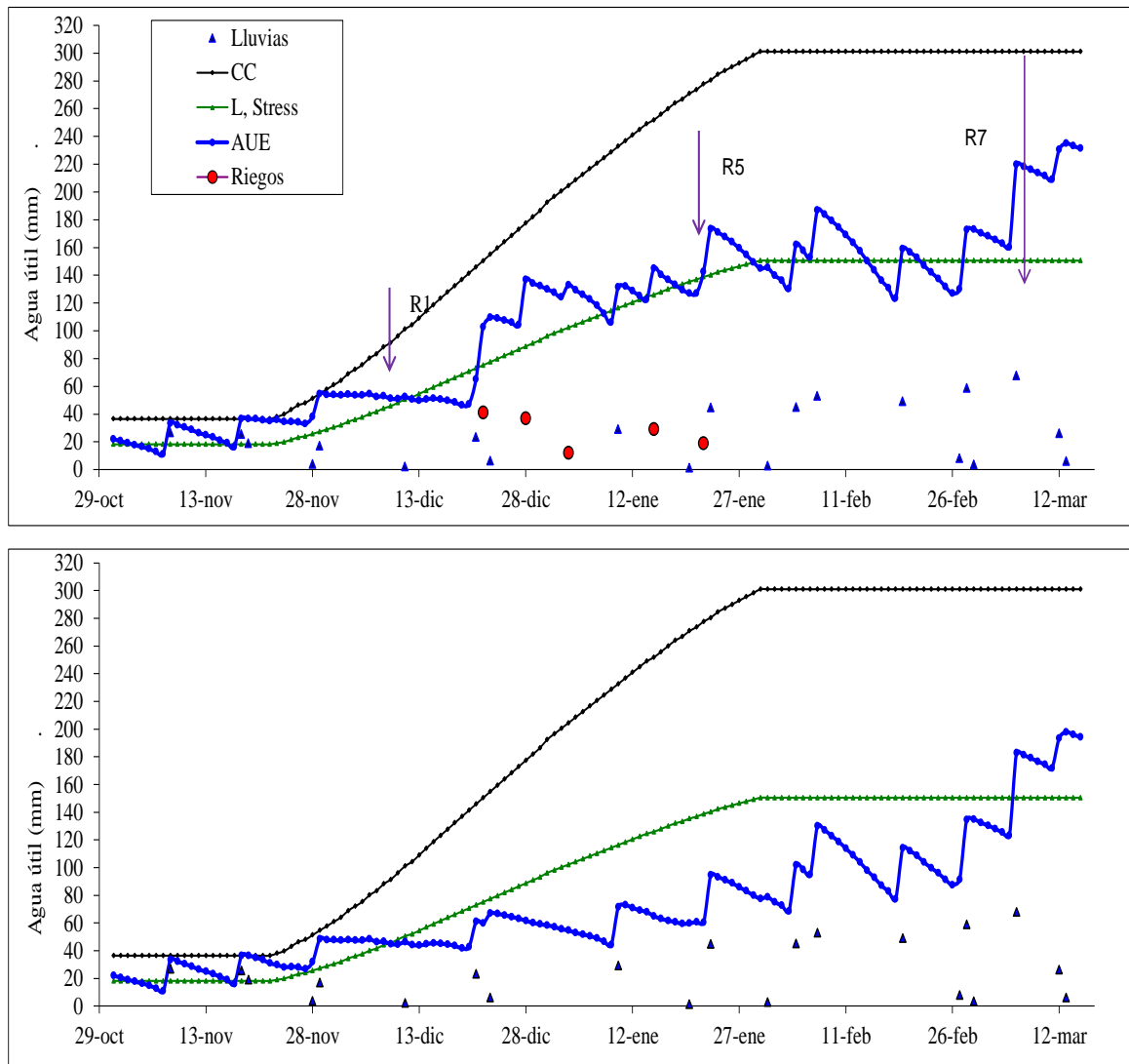


Figura 2.6. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR, fecha de siembra temprana (Te) con riego (R, arriba) y en seco (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

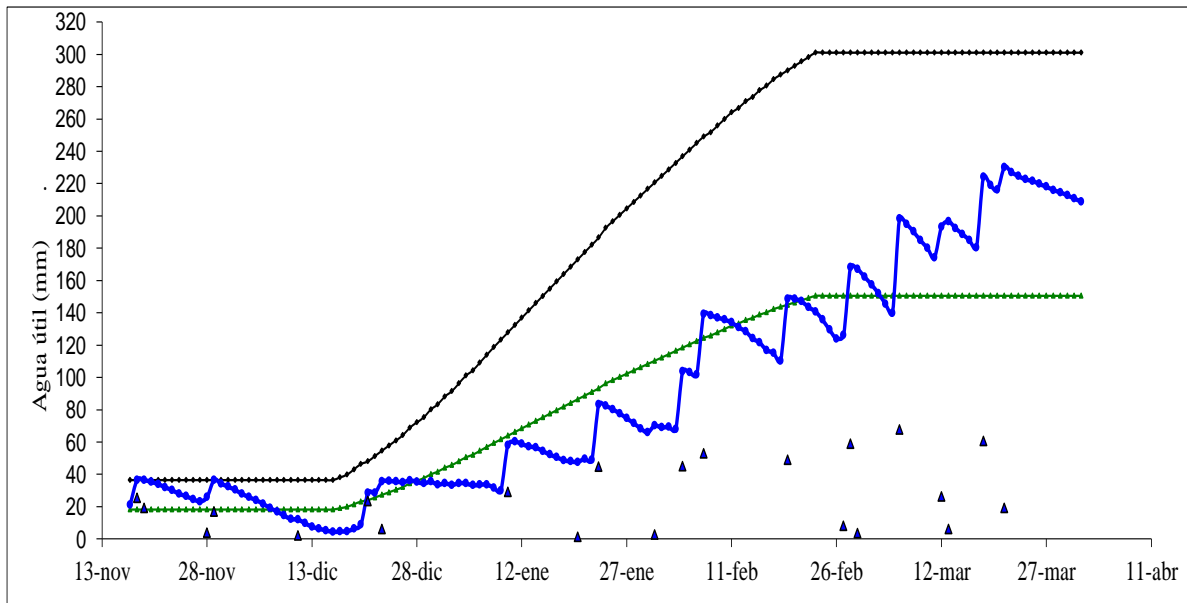
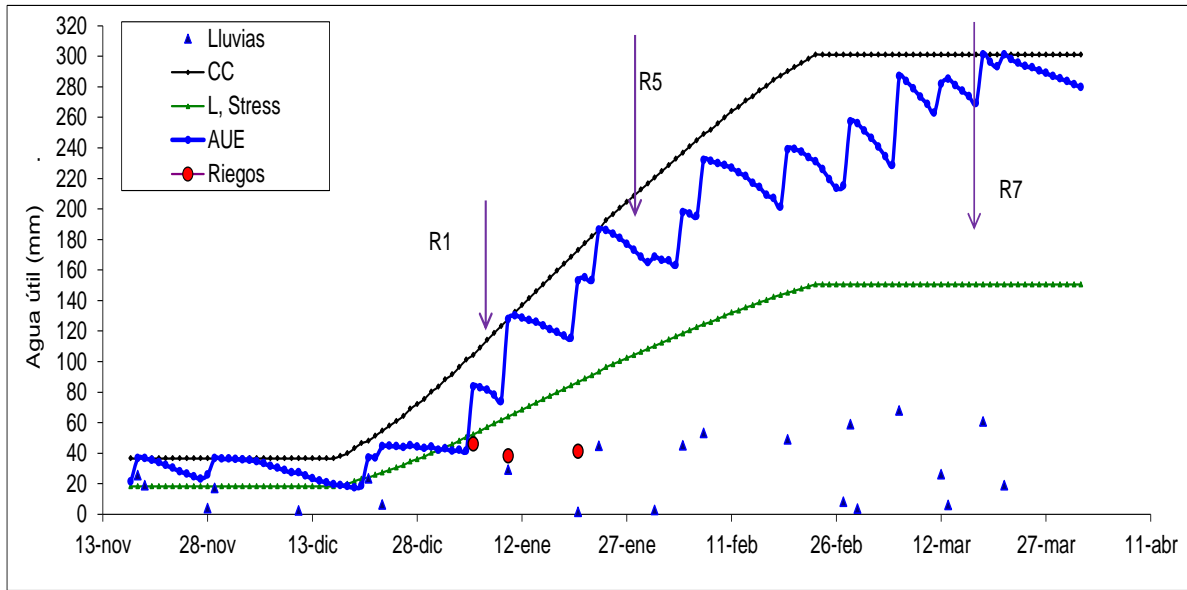


Figura 2.7. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra intermedia (I) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

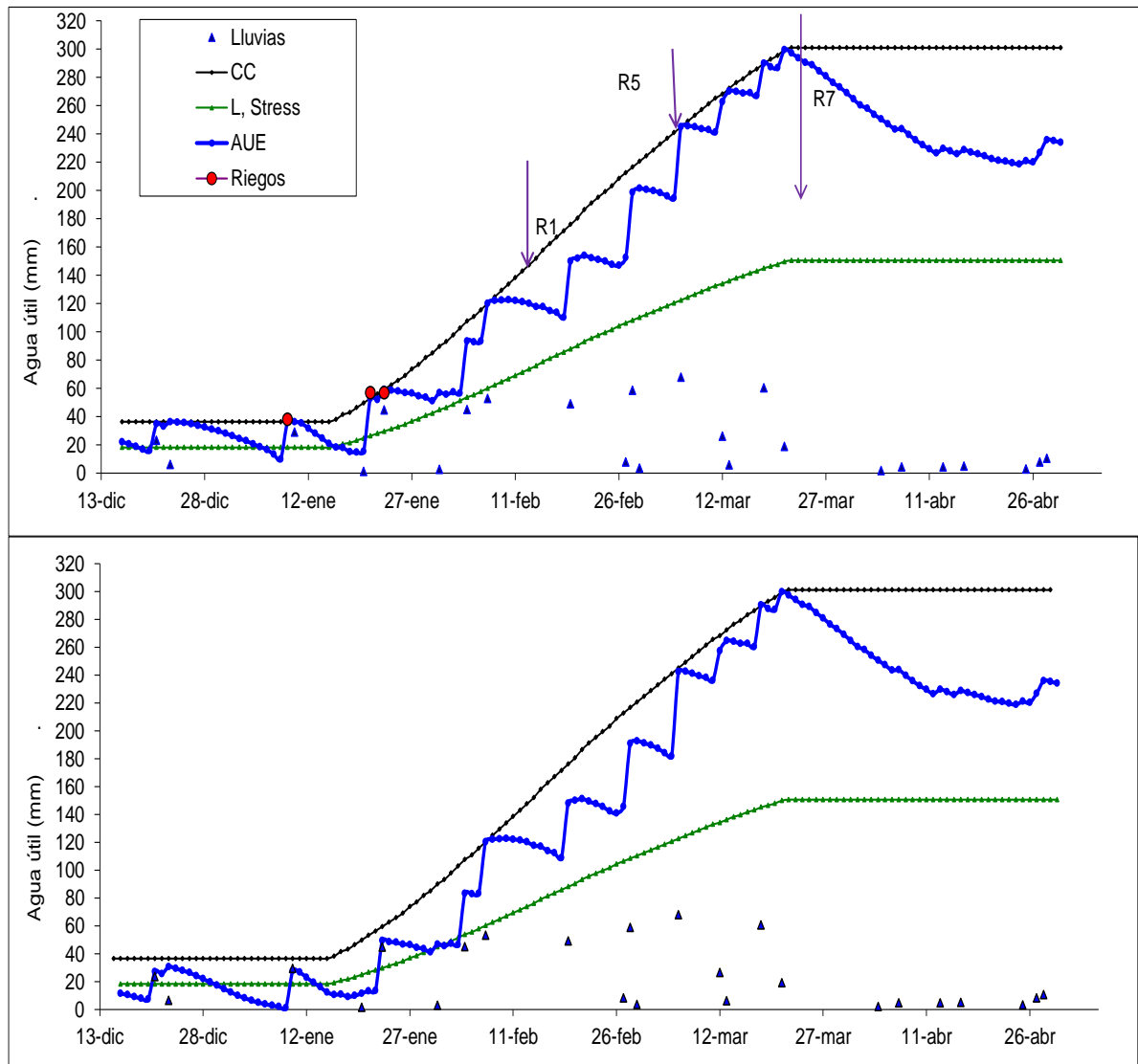


Figura 2.8. Balance Hídrico del suelo (mm) en soja, cultivar DM 4670 RR fecha siembra tardía (Ta) con riego (R, arriba) y en secano (S, abajo), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración), R5 (Llenado de Grano) y R7 (Madurez Fisiológica). Año 2011-2012.

2.3.3 Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción

Se observó una fuerte interacción año x fecha de siembra x cultivar ($P < .001$) (Tabla 2.4). Los mayores rendimientos (promedios entre los tratamientos con riego y en secano) observados en el primer año (2009-2010) fueron en la Fs Te, siendo superior un 4 % y un 16 % respecto a las Fs I y Ta, respectivamente (Tabla 2.5). En el segundo año, fue la Fs I la que obtuvo los mayores rendimientos respecto de las Fs Te y Ta, superándola en un 9 % y 39 % (Tabla 2.6).

Tabla 2.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa Total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g.) e índice de cosecha (IC), número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP), número nudos fértiles total por planta (NFT) y número de vainas por metro cuadrado (NV). Años 2009-2010 y 2011-2012.

	Análisis de la Varianza (P<)							
	RTO	NG	BT	PMG	IC	NFTP	NFT	NV
Año (A)	0,01	< 0,01	0,01	0,01	0,87	0,02	0,01	0,05
Fecha Sbra. (FS)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Cultivar (Cu)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,17	< 0,01	0,01
Riego-Secano (R-S)	< 0,01	< 0,01	0,01	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
A*FS	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	0,87	< 0,01	< 0,01	< 0,01
A*Cu	< 0,01	< 0,01	0,06	0,01	0,98	0,09	< 0,01	0,02
A*R-S	0,01	0,26	0,35	< 0,01	0,62	0,84	0,42	0,57
FS*Cu	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	0,25
FS*R-S	0,01	0,01	0,16	0,12	< 0,01	0,47	0,15	0,50
Cu*R-S	0,03	0,01	0,75	0,90	0,96	0,88	0,09	0,66
A*FS*Cu	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	0,07	0,52	< 0,01	0,12
A*Fs*R-S	0,21	0,08	0,89	0,01	< 0,01	0,47	0,21	0,95
FS*Cu*R-S	0,61	0,67	0,67	0,01	0,20	0,60	0,50	0,84
A*FS*Cu*R-S	0,11	0,09	0,89	0,03	0,35	0,51	0,02	0,80

Las interacciones de Fs x cultivar y Fs x riego-secano fueron altamente significativas ($P < 0,01$, Tabla 2.4). En el primer caso las Fs Te e I con riego difirieron estadísticamente de las del tratamiento en seco. El cultivar que logró los mayores rendimientos con riego en el año 2009-2010 fue DM 4670 RR (6.284 kg ha^{-1}). En el 2011-2012, este mismo cultivar obtuvo un 11 % más (4.726 kg ha^{-1}) que NA 3731 RG y un 19 % más que DM 5,5i en la Fs I (Tabla 2.6).

Las mayores brechas de rendimiento en ambos años de estudio ocurrieron en la Fs Ta (Tablas 2.5 y 2.6) respecto de las otras Fs Te e I. Esta brecha fue en 2009-2010 de 917 kg ha^{-1} y de 372 kg ha^{-1} en el 2011-2012, representando en términos relativos un 20 y 13

%, respectivamente. En tanto en las Fs Te e I estas brechas fueron del 9 y 4 % en el primer año y de 7 y 3 % en el segundo año.

Tabla 2.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13% humedad en soja, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) con riego (R) y en secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres grupos de madurez de soja: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Año 2009-2010.

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})		NG (m^{-2})		BT (kg ha^{-1})		PMG (g)		IC	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
Te	5.019	4.587	3.123	2.807	13.223	11.555	166	164	0,41	0,42
I	4.716	4.534	2.916	2.858	10.568	10.372	160	154	0,40	0,39
Ta	4.519	3.602	2.622	2.225	7.855	6.583	172	162	0,37	0,51
ES	110		67		510		1.9		0,02	

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})			NG (m^{-2})			BT (kg ha^{-1})			PMG (g)			IC		
	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V
Te	4.386	5.802	4.221	2.969	3.623	2.303	11.676	12.111	13.380	152	159	183	0,44	0,43	0,40
I	4.492	4.652	4.746	3.007	2.892	2.762	9.315	9.616	12.479	150	153	169	0,44	0,40	0,47
Ta	3.857	4.324	4.001	2.317	2.560	2.393	7.682	6.937	7.037	166	168	167	0,43	0,47	0,42
ES	136			82			777			2.3			0,03		
R	4.751			2.887			10.420			166			0,39		
S	4.244			2.630			9.503			160			0,46		
ES	64			38			326			1.1			0,014		

Las Figuras 2.9a y 2.9b muestran la reducción en el rendimiento al atrasar la fecha de siembra. En 2009-2010, se observó que en condiciones de riego la tasa de caída en el rendimiento del GM IV fue significativa (16 kg día^{-1} ; Figura 2.9a), en tanto que en condiciones de secano las pérdidas en el rendimiento fueron mayores para el mismo cultivar (21 kg ha^{-1}).

En el 2011-2012, con el atraso en la fecha de siembra el cultivar más afectado en disminuir el rendimiento fue la del GM V (Figura 2.9b), con una tasa de caída similar entre los tratamientos con riego y secano (alrededor de 23 kg día⁻¹).

Tabla 2.6. Promedios de rendimiento (kg ha⁻¹) corregido al 13% humedad, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha⁻¹), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) con riego (R) y en secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres grupos de madurez de soja: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Año 2011-2012.

Fecha Sbra	RTO (kg ha ⁻¹)		NG (m ⁻²)		BT (Kg ha ⁻¹)		PMG (g)		IC						
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S					
Te	4.003	3.739	2.166	2.020	10.264	9.321	185	184	0,38	0,45					
I	4.272	4.156	2.515	2.340	10.296	10.308	173	179	0,40	0,41					
Ta	2.782	2.410	1.694	1.437	6.838	6.297	164	168	0,43	0,46					
ES	101		61		427		1,3		0,02						
Fecha Sbra	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V	III	IV	V
Te	3.467	3.814	4.332	1.957	1.992	2.329	8.075	9.826	11.476	177	191	185	0,45	0,39	0,45
I	4.161	4.668	3.814	2.633	2.701	1.948	9.621	10.501	10.783	158	173	196	0,41	0,45	0,36
Ta	2.376	2.519	2.895	1.443	1.535	1.718	5.652	7.081	6.968	165	164	169	0,45	0,48	0,41
ES	124			75			591			1,6			0,03		
R	3.686			2.125			9.132			174			0,40		
S	3.435			1.932			8.642			177			0,44		
ES	58			35			278			0,74			0,01		

2.3.3.1 Componentes numéricos del rendimiento

El número de granos en las tres fechas de siembra estuvo fuertemente asociado al rendimiento ($R^2= 0.88$, Figura 2.10). El promedio de NG del tratamiento con riego fue entre

un 9 % y un 10 % mayor al tratamiento en condiciones de secano (Tablas 2.5 y 2.6) de ambos años.

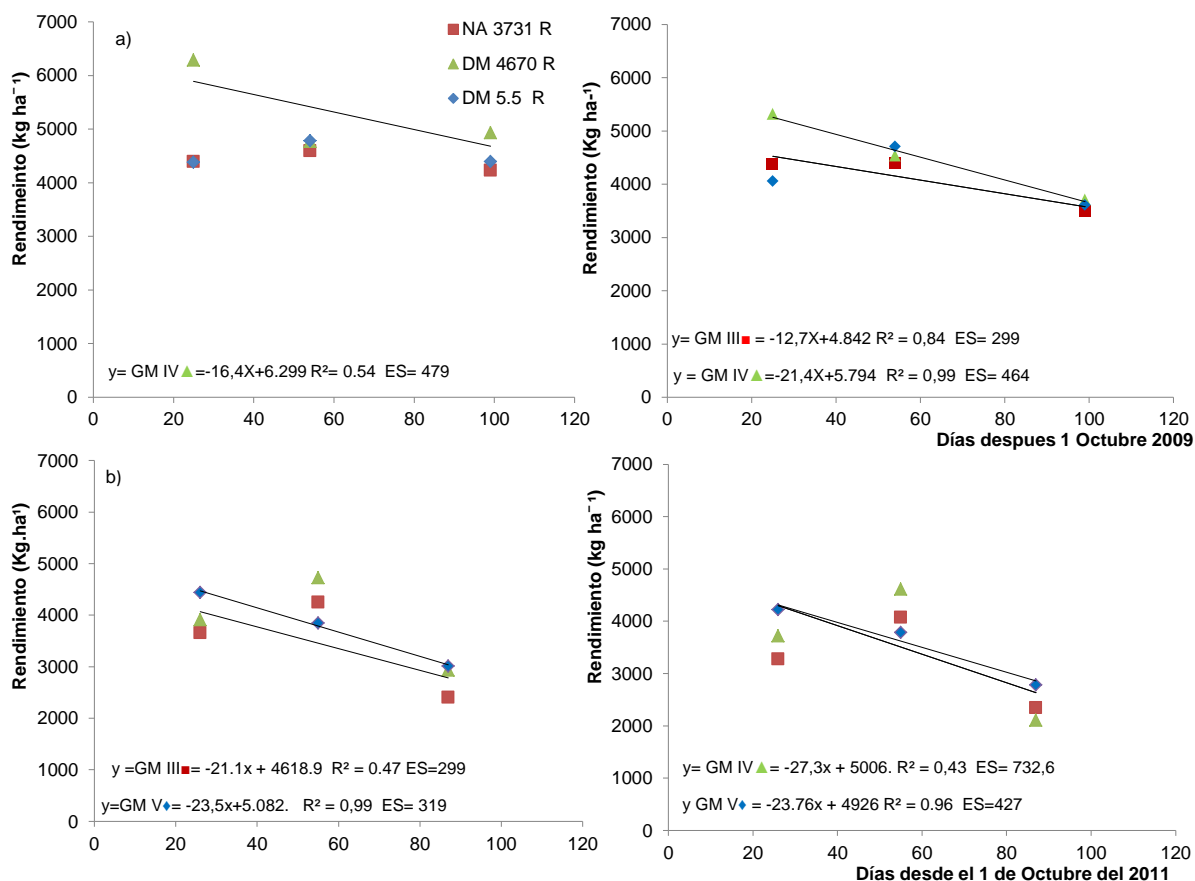


Figura 2.9. Rendimiento de soja en función de la fecha de siembra y tres grupos de madurez, con riego (R) en el panel izquierdo y en secano (S) en el panel derecho, a) Año 2009-2010 y b) Año 2011-2012. ES= error estándar de la media.

El máximo NG en condiciones de riego lo obtuvo el cultivar DM 4670 RR en la Fs Te del 2009-2010 con 3.952 NG y DM 5,5i con 2.401 NG para la misma fecha de siembra del segundo año de tesis. Esta componente mostró una interacción significativa entre año x Fs x cultivar ($P < 0.01$, Tabla 2.4). La Fs Te del 2009-2010 superó en un 2 % y un 18.% a las Fs I y Ta (Tabla 2.11), en tanto que en el año 2011-2012 la Fs I superó en un 14 % y un 36 % a las Fs Te y Ta, respectivamente (Tabla 2.6). La interacción Fs x cultivar fue fuertemente significativa ($P < 0.01$) en ambos años. Entre cultivares, DM 4670 RR y NA 3731 RG lograron el mayor NG en el tratamiento regado de la Fs Te del 2009-2010 con 3.952 y 2.905 granos por metro cuadrado. En la Fs I del 2011-2012 fueron nuevamente los mismos cultivares quienes obtuvieron los mayores valores de NG, 2.813 (DM 4670 RR) y 2.766 (NA 3731 RG; Tablas 2.5 y 2.6).

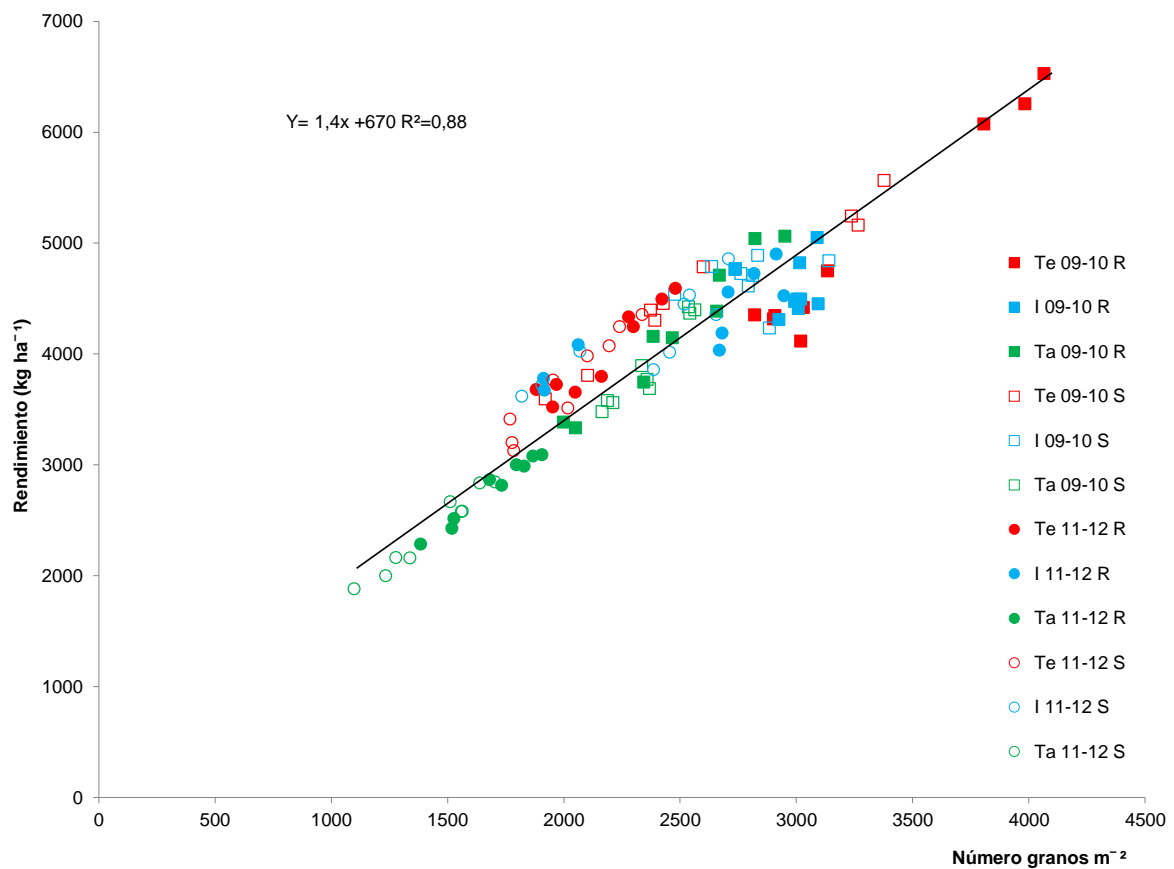


Figura 2.10. Relación entre el número de granos por metro cuadrado y el rendimiento (kg ha^{-1}) en soja para tres fechas de siembra y dos años (símbolos cuadrados: 2009-2010 y círculos: 2011-2012), símbolos llenos con riego (R) y símbolos vacíos en seco (S).

El PMG tuvo una respuesta diferente en cada año respecto a los tratamientos. El ANAVA mostró una interacción significativa año x Fs x cultivar x riego-secano ($P > 0.03$, Tabla 2.4). La Fs Te de ambos años no manifestó diferencias significativas entre los tratamientos con y sin riego (Figura 2.11). La Fs Ta del año 2009-2010 fue superior en un 2 % a la Te y en un 6 % a la I como consecuencia de generar un menor número de granos (Figura 2.10). Dentro de esta misma Fs Ta, el tratamiento bajo riego alcanzó en promedio el mayor PMG (172 g) en comparación al tratamiento en seco (162 g). Las brechas en el PMG entre los tratamientos (R-S) de este primer año fueron 1, 4 y 6 % para las Fs Te, I y Ta respectivamente. Mientras que para el 2011-2012, la Fs Te obtuvo pesos de granos mayores a las Fs I y Ta en un 5 % y 11 %. Sin embargo en este segundo año de tesis la brecha (diferencia entre riego y seco) en el PMG de las Fs I y Ta no fue significativa (Figura 2.11)

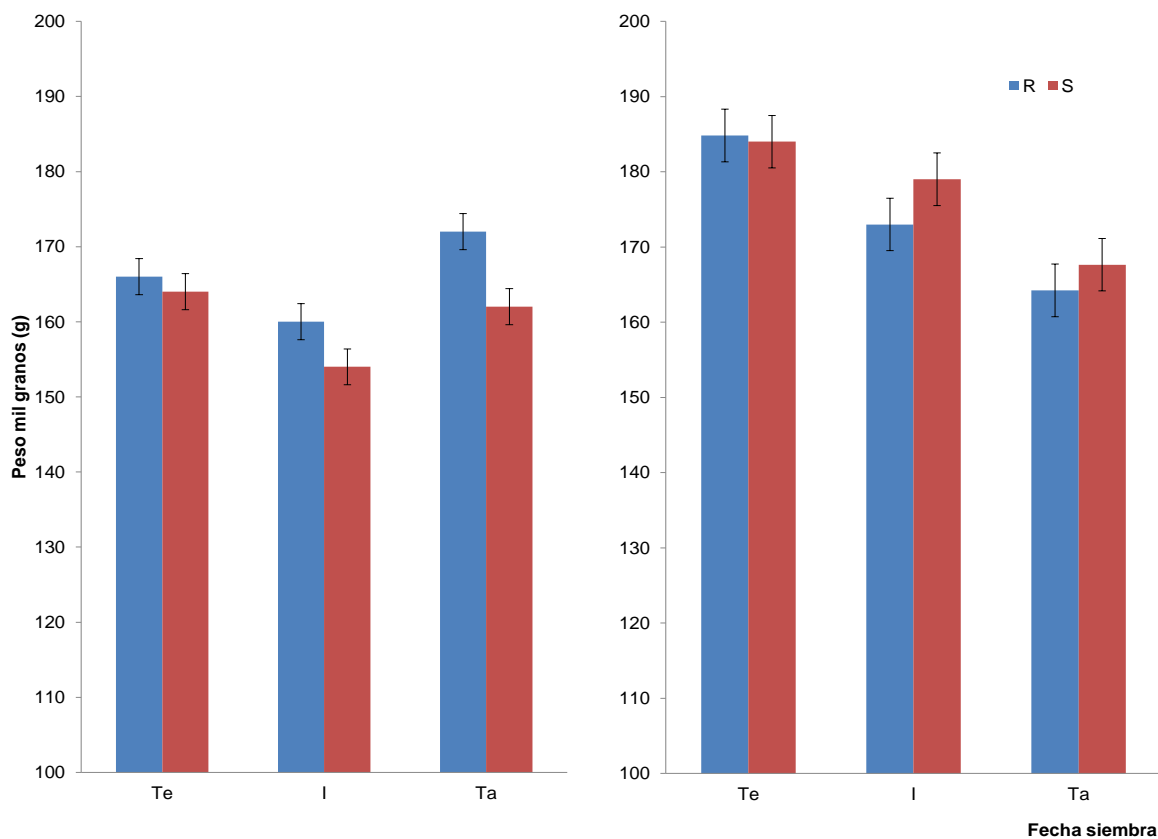


Figura 2.11. Peso promedio de mil granos (PMG) en el cultivo de soja en función de tres fechas de siembra con riego (R) y en secano (S), años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2011-2012 (panel derecho).

En las Fs I y Ta del segundo año se observó que el PMG fue mayor en los tratamientos en secano respecto a los regados, aunque estadísticamente no fue significativa la diferencia entre ellos. El GM III y IV superó en un 6 % en la Fs I y en la Ta el GM III y V lo hizo entre un 2 y un 4 % respectivamente.

En el número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP) se observaron interacciones significativas año x Fs y Fs x cultivar ($P < 0.01$, Tabla 2.4). La Fs con los mayores valores de NFTP fue la Te en ambos años, de esta manera el primer año logró en promedio 16 NFTP superando en un 4 % al tratamiento en secano, mientras que en el 2011 el tratamiento con riego obtuvo en promedio 13 NFTP representando un 10 % más de nudos en el tallo principal que el tratamiento limitado por agua. En la Fs I del 2009-2010, la brecha fue de un 2 % y en el 2011-2012 la brecha fue mayor (un 6 % más). Respecto a la Fs Ta solo hubo brecha significativa en el año 2009-2010 (11 vs. 10 NFTP) mientras que en el siguiente año no hubo diferencias entre tratamientos (12 NFTP, Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Promedios del número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP), el número nudos fértiles total por planta (NFT) y el número de vainas por metro cuadrado (NV) con riego (R) y en secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, en tres grupos de madurez: GM III= NA 3731 RG, GM IV= DM 4670 RR, GM V= DM 5.5i. (ES= error estándar de la media). Años 2009-2010 y 2011-2012.

Año	2009-2010						2011-2012					
Fecha Sbra	NFTP		NFT		NV (m ⁻²)		NFTP		NFT		NV (m ⁻²)	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
Te	16	15	51	47	2.398	2.177	13	12	30	26	1.723	1.465
I	14	13	30	28	1.876	1.812	12	11	30	29	2.001	1.649
Ta	11	10	21	19	1.672	1.568	12	12	30	24	1.824	1.696
ES	0,51		2,2		88		0,46		1,32		154	

Año	2009-2010									2011-2012								
Fecha Sbra.	NFTP			NFT			NV (m ⁻²)			NFTP			NFT			NV (m ⁻²)		
	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM V	GM III	GM IV	GM III	GM IV	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V	GM III	GM IV	GM V
Te	15	15	18	41	39	68	1.998	2.770	2.492	12	12	14	29	28	27	1.549	1.664	1.568
I	13	14	14	28	28	32	1.688	1.872	1.973	12	11	12	27	30	32	1.934	1.879	1.663
Ta	11	11	10	20	20	20	1.710	1.556	1.594	13	12	11	26	29	27	1.648	2.019	1.613
ES	0,63			1,9			108			0,56			1,62			189		
R	14			33			1.982			12			30			1.849		
S	13			29			1.853			11			26			1.603		
ES	0,29			0,9			51			0,26			0,77			89		

Dentro de los cultivares, el que mayor NFTP obtuvo fue el GM V con 18 en la Fs Te del 2009-2010 y 14 NFTP en la misma Fs del 2011-2012 bajo condiciones de riego, en la Fs I solo hubo diferencia entre los tratamientos con y sin riego en NA 3731 RG (13 vs. 12 NFTP en 2009 y 12 vs. 11 NFTP en 2011-2012) respecto a DM 4670 RR y DM 5.5i (14 NFTP en el primer año y 11 NFTP en el segundo año promedio entre tratamientos).

El número de nudos fértiles totales (NFT) mostró una triple interacción significativa año x Fs x cultivar ($P < 0.01$, Tabla 2.4). La Fs Te en condiciones de riego obtuvo los mayores valores de NFT en planta en los dos años (73 en el 2009-2010 y 34 en el 2011-2012), las brechas del 2009-2010 fueron de un 9 y un 4 % más para las Fs Te e I, en tanto que no hubo brecha en la Fs Ta. En 2011-2012 estas brechas fueron de un 10, 5 y 11 %

para las Fs Te, I y Ta, respectivamente (Tabla 2.7). La brecha promedio entre cultivares por Fs fue mayor en el primer año de evaluación. De esta manera, el GM V obtuvo los mayores valores de NFT (un 50 % y un 43 %) que NA 3731 RG y DM 4670 RR en la Fs Te mientras que en la Fs I este mismo cultivar superó a las otras dos en un 12 %. En el segundo año no se manifestó la misma tendencia ya que para la Fs Te fue NA 3731 RG quien obtuvo un 6 y un 10 % más de NFT que DM 4670 RR y DM 5,5i. En la Fs I fue DM 5,5i con un mayor NFT (un 15 y un 6 %) que NA 3731 RG y DM 4670 RR y para la Fs Ta fue DM 4670 RR quien obtuvo un 12 % y un 7 % más de nudos que NA 3731 RG y DM 5,5i (Tabla 2.7).

El número vainas por metro cuadrado (NV) mostró una interacción año x Fs y Fs x cultivar que dió significativo ($P < 0.05$, Tabla 2.4). Las brechas del NV del 2011-2012 fueron mayores en las tres Fs respecto al 2009-2010 (Fs Te: 15 vs. 10 %; Fs I: 18 vs. 4 %; Ta: 8 vs. 7 %), probablemente esta menor cantidad en el NV del tratamiento en seco sea producto de temperaturas máximas por arriba de los 30°C en las tres Fs del 2011-2012 (Tabla 2.3). En el 2009-2010 la Fs Te fue la que mayor NV promedio tuvo respecto a las Fs I y Ta (20 % y 30 % más de NV). En el 2011-2012 fue la Fs I quien superó a las Fs Te y Ta (con 13 % y 6 % más NV). Entre cultivares DM 5,5i superó en un 20 % y un 5 % a NA 3731 RG y DM 4670 RR en la Fs Te, mientras que en la Fs I nuevamente tuvo el mayor NV (15 y 5 % más que NA 3731 y DM 4670) y en la Fs Ta NA 3731 RG obtuvo un 10 y un 5 % más de NV que DM 4670 y DM 5,5 (Tabla 2.7). En el 2011-2012 las brechas entre cultivares fueron menores en la Fs Te (alrededor de un 7 %) y para la Fs Ta DM 4670 RR presentó un 21 y un 19 % más de NV que NA 3731 RG y DM 5,5i.

2.3.3.2 Brechas de Rendimiento y sus componentes

Las brechas relativas de rendimiento por cultivar, por fecha de siembra y por año demostraron ser mayores en promedio en la Fs Ta en ambos años de estudio (Figura 2.12 a), siendo de mayor magnitud en la Fs Ta del 2009-2010 (20 %) respecto a la del 2011-2012 (13 %), sus valores rondaron entre 17,5 a 25 % en el primer año y entre 3 a 28 % en el segundo año de evaluación. Dentro de esta Fs Ta, se destacó el cultivar DM 4670 RR (15 % en 2009-2010 y 28 % en 2011-2012) diferenciándose significativamente de los otros dos cultivares (Figura 2.12 a). En tanto que las menores brechas de rendimiento promedio se dieron en la Fs I de los dos años (2009-2010: 4 % y 2011-2012: 3 %) mientras que entre los GMs no hubo diferencias significativas (Figura 2.12a) En la Fs Te las brechas de rendimiento relativa en promedio fueron de 7 y 8 % en los dos años, presentando una mayor variación en el 2009-2010 (0,25 a 15 %) siendo estas variaciones significativas estadísticamente entre los cultivares. Esta tendencia se repitió con el número de granos. Las

mayores brechas en el NG se dieron en la Fs Ta (Figura 2.12 b), el promedio de los dos años de estudio fue un 14,5 %, y las menores brechas fueron en la Fs I, un 2 % en el primer año y un 6 % en el segundo año. Entre cultivares hubo diferencias significativas en la Fs Ta del 2011-2012, siendo el GM IV el de mayor magnitud de brecha relativa, por detrás el GM V y por último GM III (28, 11 y 5 %).

Respecto al número de nudos fértiles totales por planta las brechas mayores fueron tanto en la Fs Ta como en la Te, dependiendo del año (Figura 2.12c). De tal manera que la brecha relativa del NFT en la Fs Te del 2009-2010 varió desde 0,2 a 15 % entre los cultivares, mientras que en la Fs Ta esta brecha presentó un rango de 1 a 9,5 %, siendo el GM V quien se diferenció significativamente del resto. En tanto que en el 2011-2012 la Fs Ta fue la de mayor brecha (17 % en promedio) destacándose el GM V que se diferenció significativamente de los otros cultivares (Figura 2.12c). Nuevamente como en el NG, en el NFT las menores brechas promedio en los dos años se dieron en la Fs I (6 y 4 %) respectivamente.

Las brechas en el número de vainas por metro cuadrado fueron diferentes en los dos años evaluados (Figura 2.12 d). En el primer año las brechas en el NV entre las fechas de siembra variaron desde un 3 % (Fs I), 6 % (Fs Ta) y 9 % (Fs Te). Dentro de la Fs Te 2009-2010 hubo diferencias significativas entre los cultivares (Figura 2.12 d) superando en el valor de brecha DM 5.5 i con 14,3 %. En tanto que en NA 3731 RG y DM 4670 RR las brechas fueron de 10 y 2,7 %. En las otras dos Fs I y Ta del 2009-2010 DM 5.5i se diferenció estadísticamente de los otros cultivares en un 8 y 7 %.

En cuanto al segundo año el promedio de brecha en el NV por Fs fue de 14,5 %, 17 % y 7 % (Te, I y Ta), en este caso es la Fs I quien presentó el mayor valor de brecha. En tanto que la Fs Ta de ese mismo año fue la de menor brecha NV, entre los cultivares el GM IV alcanzó un 2 % a diferencia de los otros GMs que alcanzaron una brecha de 7 y 13 % (GM III y V).

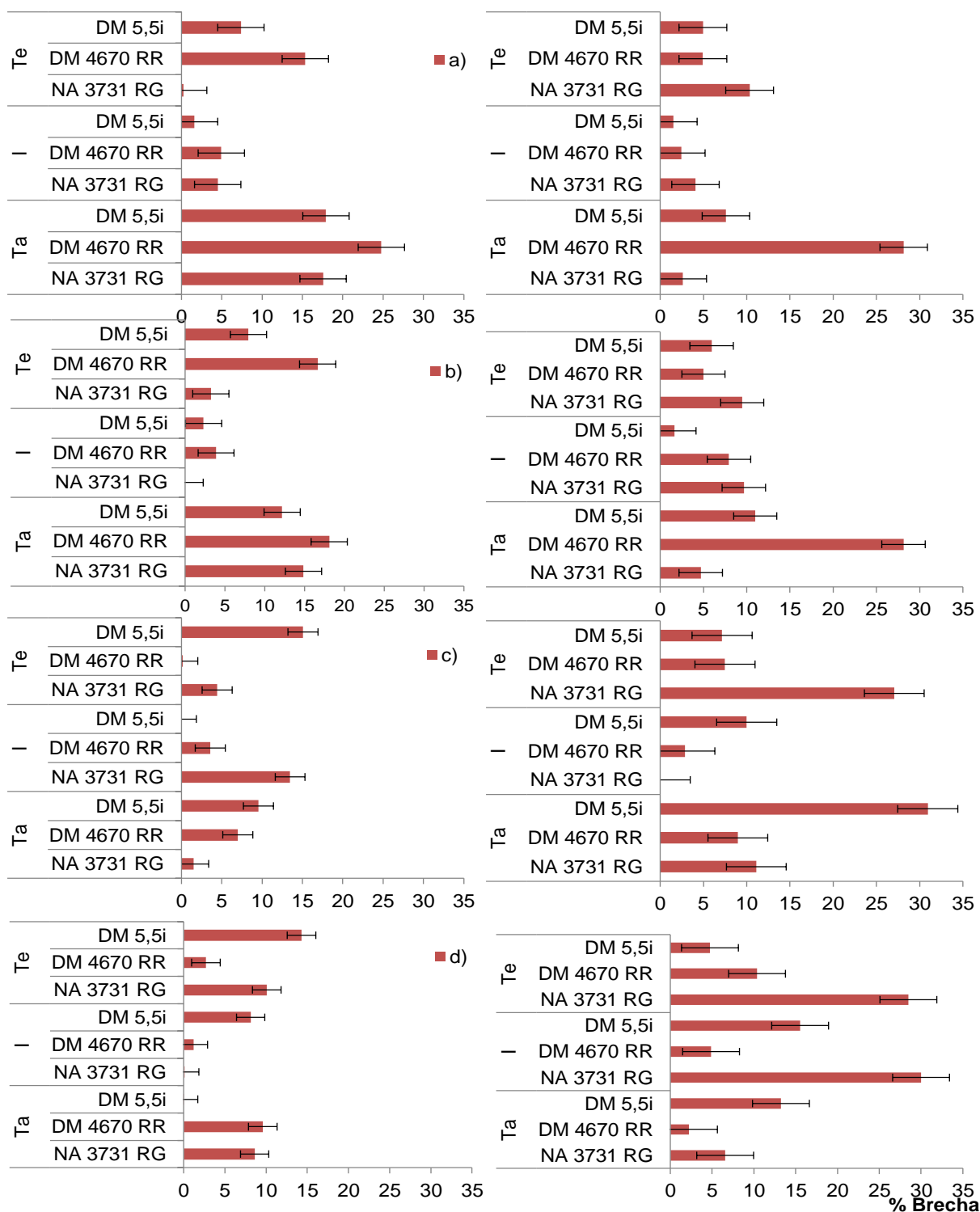


Figura 2.12. Brecha relativa de rendimiento (a), número granos por metro cuadrado (b), número nudos fértiles totales c) y número vainas por metro cuadrado (d) en el cultivo de soja, en función de tres fechas de siembra y tres cultivares. Años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2011-2012 (panel derecho).

2.3.3.3 Producción de Biomasa e Índice de Cosecha

La producción de biomasa en R7 (BT) estuvo asociada al rendimiento ($R^2= 0.47$, Figura 2.14). La interacción año x Fs x cultivar para BT fue significativa ($P<0,014$, Tabla 4).

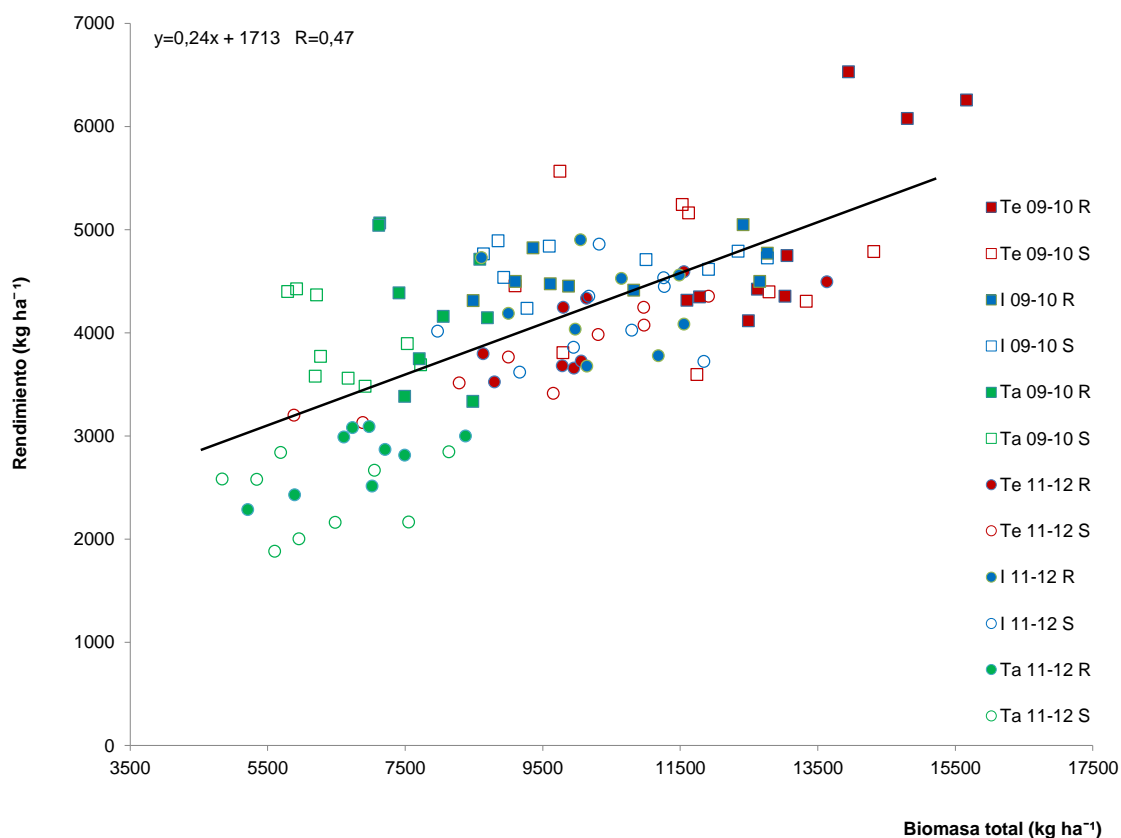


Figura 2.13. Relación entre Biomasa Total en R7 y el rendimiento en el cultivo de soja, tres fechas de siembra y dos años de evaluación (símbolos cuadrados: 2009-2010 y círculos: 2011-2012), símbolos llenos con riego (R) y símbolos vacíos en seco (S).

La brecha fue en promedio un 9 % y un 6 % en los años 2009-2010 y 2011-2012 (Tablas 2.5 y 2.6). La mayor producción de biomasa se dio en la Fs Te del año 2009-2010, el promedio fue de $12.389 \text{ kg ha}^{-1}$, mientras que en las Fs I y Ta obtuvieron 10.470 y 7.219 kg ha^{-1} . En el 2011 la mayor cantidad de biomasa se dio en la Fs I con $10.302 \text{ kg ha}^{-1}$, las Fs Te y Ta dieron 9.792 y 6.567 kg ha^{-1} .

Dentro de los cultivares, fue DM 5,5i el cultivar que mayor BT obtuvo en ambos años y difirió significativamente de los otros dos genotipos (DLS al 5 %) en las Fs Te e I (Tablas 2.5 y 2.6).

El IC mostró una tendencia a incrementarse en las fechas de siembras tardías en los dos años. Es así que la Fs Ta del 2009 superó en un 6 % y un 12 % a las Fs Te e I. La triple interacción año x Fs x riego-secano fue significativa ($P < 0.01$, Tabla 2.4). En condiciones de secano el IC fue superior en un 16 % (2009-2010) y un 10 % (2011-2012) al tratamiento con riego (Tablas 2.5 y 2.6). Entre cultivares DM 4670 RR obtuvo (promedio de las tres fechas de siembra) el mayor IC, respecto a NA 3731 RG y DM 5,5i (0.44 versus 0.43 y 0,39).

2.4 Discusión

Las abundantes precipitaciones en el año 2009-2010 (superaron el cuartil 75 de la distribución histórica para la serie Oliveros) durante el subperiodo de determinación del rendimiento (R1-R5) de la Fs Te explican los altos rendimientos en condiciones de secano. Un año con una alta probabilidad de tener lluvias por encima de lo normal (un valor alrededor de los 200 mm en promedio vs casi 400 mm durante el periodo crítico) comparado con el año 2011-2012 donde las probabilidades fueron menores (un 36 y un 50 % por debajo del promedio histórico y del percentil 75. En el 2009-2010 los rendimientos fueron mayores que en el 2010-2011 destacándose la Fs Te donde el subperiodo R1-R5 en los tres cultivares coincidió con los mayores picos de lluvias.

Los máximos rendimientos alcanzables son particulares de cada sitio. Sinclair (2012) en una amplia región de USA demostró que el máximo rendimiento en secano varía año a año en función de las lluvias, pero con un buen manejo de nutrientes y provisión de agua se puede obtener rendimientos máximos de hasta 6.000 kg ha^{-1} en siembras óptimas. Zhang et al., (2010) obtuvieron rendimientos de hasta 8.600 kg.ha^{-1} en Massachusetts (USA), mientras que Grassini et al., (2015a) estimaron usando modelos de simulación rendimientos potenciales en un rango entre los 4.400 y 7.100 kg ha^{-1} según las variaciones climáticas en cada año de Nebraska (USA). En ambientes más tropicales, Bathia et al., 2008 obtuvieron rendimientos potenciales en la India inferiores a los obtenidos en esta tesis (2.070 - 3.850 kg ha^{-1}), concluyendo que el rendimiento potencial fue más estable que el rendimiento limitado por agua en todas las regiones donde se llevó a cabo la investigación.

Los menores rendimientos del tratamiento bajo riego para la misma Fs Te del 2011-2012 podrían justificarse por un lado debido a que durante el periodo crítico de determinación del rendimiento hubo un menor aporte de lluvias sumado a que el riego aplicado no fue suficiente para elevar el contenido de humedad del suelo ya que siempre estuvo por debajo de la capacidad de campo; en el tratamiento en secano esta condición se agravó aún más (Figura 2.6 a y b). Por otro lado las temperaturas máximas estuvieron por

encima de los 30°C y hubo una mayor acumulación de radiación solar durante todo el ciclo del cultivo de esta Fs Te.

Los rendimientos potenciales hallados en este trabajo para las Fs Te e I (6.284 y 4.784 kg ha⁻¹) fueron similares a los mencionados por Mercau et al., (2007). Estos autores utilizando modelos de simulación (DSAAT) en la región Sur de Santa Fe, determinaron que el rendimiento potencial varía entre 5.000 y 5.900 kg ha⁻¹ en fechas de siembras tempranas y dentro del rango de los 4.500 a 5.000 kg ha⁻¹ en fechas de siembras normales u óptimas para la zona Centro de la Región Pampeana.

Por otra parte las mayores brechas de rendimiento se dieron en la Fs Ta (Figura 2.13) asociado a una menor disponibilidad hídrica en el suelo durante el subperiodo R1-R5, en el primer año. En este sentido Egli (2014) mostró que en condiciones de sequo, las variaciones anuales en la brecha de rendimiento y su magnitud dependían de la disponibilidad del agua almacenada en el suelo. Mientras que en el 2011-2012 esta carencia de agua se manifestó en la etapa vegetativa del cultivo en la misma Fs afectando negativamente el crecimiento y por otro lado retrasando la floración entre dos y diez días según el cultivar (Tabla 2.2), llegando al período reproductivo (R1-R5) con una menor biomasa. A partir de este subperiodo comienza a acortarse el ciclo de los cultivares entre uno y diez días condicionado por el fotoperiodo (ANEXO I) y las altas temperaturas. Varios estudios han demostrado que en las fechas de siembras tardías el período crítico del cultivo no solo está condicionado a la provisión de agua y elevadas temperaturas sino también al efecto del fotoperiodo que se va acortando e induce de forma temprana la floración y se acortan las fases de desarrollo reproductivo (Calviño, 2003; Martignone et al., 2006). En este trabajo de tesis, encontramos que para el subperiodo correspondiente a E-R1, los días se redujeron en promedio entre tres (2009-2010) y cinco días (2011-2012) al comparar la fecha de siembra temprana con la tardía de ambos años. En este mismo contexto se observó además que para el subperiodo siguiente (R1a R5) estas reducciones en la duración de los días variaron entre 24 (2009-2010) y 31 días (2011-2012) en promedio de los tres cultivares, siendo el GM V el más afectado frente a las modificaciones en la fecha de siembra respecto de los otros dos grupos de madurez. Martignone y col. (2006) mediante un modelo de función lineal que incluye la temperatura media y el fotoperiodo analizó la tasa de desarrollo en distintos grupos de madurez. Este autor observó que el modelo se ajustó mejor en los cultivares nuevos respecto a los viejos en etapas después de la floración, encontrando que la sensibilidad fotoperiódica y térmica varían según el grupo de madurez acortando el ciclo con el atraso en la fecha de implantación del cultivo.

En este estudio las menores brechas relativas de rendimiento se dieron en la Fs I de ambos años (4 y 3 %), en tanto que las mayores brechas de rendimiento fueron en la Fs Ta (2009-2010: un 20 y 2011-2012: un 13 %). Estas menores brechas de rendimiento en ambos años podría deberse a que el cultivo en secano pudo expresar su producción en condiciones de disponibilidad de agua no limitante, con excepción de la Fs Te e I del 2011-2012 donde el riego aplicado no fue suficiente para lograr que la disponibilidad de agua este en capacidad de campo. Grassini y col. (2015a) evaluaron las brechas de rendimiento en Nebraska utilizando lotes de producción y modelos de simulación determinando brechas de rendimiento (RP y RA) relativamente pequeña (entre el 20 % y 30 %). Estos autores además demostraron que las variaciones en los rendimientos de los lotes se debían entre otras causas a las fechas de siembra y el manejo de los Grupos de madurez. En este trabajo de tesis frente a un manejo óptimo del cultivo (variaciones en la fecha de siembra junto con la combinación de distintos genotipos sin limitaciones hídricas y nutricionales) el resultado de las brechas (RP-RAs) fueron inferiores a las estimadas por el Atlas global de Brechas de Rendimiento para la zona centro de la Pampa (RP y RAs: 25-35 %, Grassini, 2015b, <http://yieldgap.org/methods>), indicando que esta brecha es posible de explotar en ambientes donde el agua no sea una limitante. Cassman (1999) atribuye que cuando la producción de un cultivo es superior al 80 % de su máximo potencial, las posibilidades de disminuir las brechas son menores e implica un mayor conocimiento de los factores que controlan los procesos fisiológicos de las plantas, de las tecnologías de manejo y de su interacción con el ambiente.

En cuanto a los componentes numéricos, el NG estuvo asociado al rendimiento por lo que en la medida que se atrasaron las fechas de siembra este componente fue disminuyendo debido a una menor duración del período crítico (Tabla 2.2) de la definición del rendimiento. El NG depende por un lado del número de nudos fértiles, del número de nudos por unidad de superficie que a su vez determinan el número de frutos por unidad de superficie y el número de semillas por fruto (Egli, 1998, Kantolic et al., 2003). El NG además está muy ligado a la disponibilidad de fotoasimilados diarios (Egli et al., 1991) durante el período crítico (entre R3 y R6) (Kantolic et al., 2001). Los mayores valores en los dos años de evaluación de esta tesis para los tratamientos con riego estuvieron dentro del rango de los 3.623 y 2.329 NG en la Fs Te y en 2.600 y 1.700 NG en la Fs Ta correspondientes a los GM IV y V, respectivamente. Estos valores fueron similares a los de Kantolic y col. (2001) para las mismas fechas de siembra y grupos de madurez, quien obtuvo en experimentos bajo riego valores entre los 2.900 y 3.700 NG (fecha de siembra temprana) y de 2.300 y 3000 (siembras tardías) en GM IV y V demostrando que el período de formación de vainas y

semillas está asociado a la sensibilidad del fotoperiodo en post-floración y esto afecta al NG (Nico et al., 2015). En este mismo trabajo el número de nudos fértiles totales (NFT) y el número de nudos fértiles en tallo principal (NFTP) disminuyeron con el atraso en la fecha siembra tal como ocurrió en esta investigación.

Entre los cultivares, el que mayor incremento en el NFTP Y NFT en cada fecha de siembra fue el del GM V respecto a los otros dos.

El número de vainas por metro cuadrado (NV) también estuvo asociado al rendimiento y sus valores disminuyeron con el atraso en la siembra (Egli and Yu, 1991), sin embargo es el componente del rendimiento donde las brechas relativas fueron mayores en la Fs Te (máximo valor 19 %), lo opuesto a lo observado para la brecha del NG. Esto hace suponer que el cultivo al haber estado expuesto a una buena oferta de recursos (luz y agua) en el tratamiento bajo riego maximizó la producción de vainas, pero no logró fijar los granos en su totalidad quizás por un efecto de provisión de fotoasimilados, o por un estrés térmico durante el periodo crítico ya que las temperaturas fueron cercanas a 30 °C en el 2009-2010 y en el 2011-2012 estuvieron por encima de los 30°C (Tabla N° 2.3). Molino (2011) por su parte determinó que la soja expuesta a temperaturas por encima de los 26°C durante periodos breves asociadas a condiciones de estrés hídrico redujeron hasta un 38 % y un 42 % las tasas de fijación de vainas y de fijación granos (R3 y R5) provocando un impacto negativo sobre el rendimiento. Esto explicaría en parte la mayor brecha encontrada en el NV en las Fs Te e I y las menores brechas en la Fs Ta (12 y 9 %). Las brechas encontradas en el NG, NFT, NFTP y NV fueron menores al 20 % incluyendo la fecha de siembra Ta, la cual no superó a este valor (entre un 5 y un 16 %, Figura 2.13), reflejando que bajo las condiciones ambientales de los experimentos de esta tesis, los componentes numéricos estuvieron por encima del 80 % por lo que las posibilidades de mejorar desde el manejo y la tecnología se reducen (Cassman, 1999).

En cuanto al peso de mil granos, en general no disminuyó con el atraso en la siembra, sino que se mantuvo. En tanto que en las siembras normales y tardías del 2011-2012 de la tesis se observó un incremento en el tratamiento en seco.

2.5 Conclusiones

1a) La hipótesis planteada en este trabajo es rechazada ya que los mayores rendimientos potenciales solo se obtuvieron en las fechas de siembras más temprana combinado con el cultivar de ciclo intermedio (GM IV) en el primer año.

1b) Las menores brechas de rendimiento se obtuvieron en fechas de siembras intermedias, y las mayores en las fechas de siembras tardías coincidiendo con una menor oferta de radiación solar incidente y menor disponibilidad hídrica.

1c) El número de vainas por unidad de superficie no reflejó las brechas de rendimiento.

2.6 Bibliografía

Andriani, J. y Bodrero, M. 1997. Necesidades de agua del cultivo de soja e influencia del riego suplementario sobre el rendimiento. SOJA, Revista Para Mejorar la Producción N° 5. Campaña 1996/1997. EEA INTA Oliveros. Pág. 45-48.

Aramburu Merlos, F., Monzón, J., Mercau, J., Taboada, M., Andrade, F., Hall, A., Jobbagy, E., Cassman, K., Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184: 145-154.

Bacigaluppo, S., Bodrero, M.L., Balzarini, M., Gerster, G., Andriani, J., Enrico, J., Dardanelli, J. 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *European Journal Agronomy*, 35: 247–254.

Bacigaluppo, S.; Bodrero, M.; Gonzalez, C. 2009. Estabilidad en el rendimiento de cultivares de soja en el sur de Santa Fe. Campaña 2008/09. Para mejorar la producción N° 42. EEA INTA Oliveros 2009, pp 15-17.

Bahícu 1.02. Balance hídrico de cultivos www.inta.gov.ar/Oliveros. 2013.

Bhatia, V., Singh, P., Chauhan, G., Kesava Rao, A., Mishra, A., Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agriculture and Meteorology* 148: 1252-1265.

Board, J. and Q. Tan. 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science*, 35:846-851.

Board, J., Hall, W. 1984. Premature Flowering in Soybean Yield Reductions at Non optimal Planting Dates as Influenced by Temperature and Photoperiod.

Bussel, L., Grassini, P., Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., De Groot, H.; Saito, K., Cassman, K., Van Ittersum, M. 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crop Research* 177: 98-108.

Calviño P, Sadras V., Andrade F. 2003. Development, growth and yield of late-sown soybeans in the southern Pampas. *European Journal of Agronomy*, 19: 265–275.

Cassman, K. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceeding of the National Academy of Sciences U.S.A.* 96: 5952–5959.

Cooper, R. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *Field Crops Research*, 82: 27-35.

Cooper, R., Fausey, N. & Streeter, J. 1991. Yield Potential of Soybean Grown under a Subirrigation /Drainage Water Management System. *Agronomy Journal*, 83: 884-887.

Cooper, R. 1989. High yield system in place (HYSP) concep for soybean production. *Journal of Production Agriculture*, 2: 231-324.

Cooper, R. 1985. Breeding semidwarf soybeans. In: Janick, J. (Ed). *Plant Breeding Reviews*, volume III. AVI publishing co. Inc., Wesport, CT, pp 289-309.

Cuniberti, M., Herrero, R. y Masiero, B. 2011. Evolución del contenido de proteína y de aceite en la región sojera argentina. En: *Mercosoja 2011 y 5° Congreso de la soja del Mercosur, I Foro de la Soja Asia-Mercosur*. 14 al 16 de Setiembre, Rosario.

de Felipe, M., Gerde, J. and Rotundo, J. 2016. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Science Society of America*. 56:3066-3077.

Egli, D. and J., Hatfield. 2014. Yield gaps and yield relationships in central U.S. soybean production systems. *Agronomy Journal*, 106: 560-566.

Egli, D. 2010. Soybean yield physiology: principles and processes of yield production. In: Singh, G. (Ed.), *the Soybean: Botany, Production and Uses*. CABI, Wallingford, UK, pp. 113-141.

Egli D., Bruening W. 2000. Potential of early-maturing soybean cultivars in late plantings .*Agronomy Journal*, 92:532–537.

Egli, D.1998. *Seed Biology and the Yield of Grain Crops*. CAB International, Wallingford, UK.

Egli, D. 1997. Cultivar maturity and response of soybean to shade stress during seed filling. *Field Crops Research*, 52: 1-8.

Egli, D., Yu, Z. 1991. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean. *Crops Science*, 31: 439-442.

Enrico, J.; Bodrero, M.; Gentili, O. Comportamiento de cultivares de soja en siembras de primera en Oliveros y Casilda, Campaña 2008/09. Para mejorar la producción N° 42. EEA INTA Oliveros 2009, pp 19-26.

FAOSTAT 2014: FAO Statistical Databases <http://faostat.fao.org/site/>

Fehr W., Caviness C. 1997. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University; 1997. (IA)

Flannery, R. 1983 Soybean Research Yields top 118 bu/A. *Better Crops with Plant Food* 68: 6-7. 1983.

Jiang, H., Egli, D. 1993. Shade induced changes in flower and pod number and Flower and fruit abscission in soybean. *Agronomy Journal*, 85: 221–225.

Grassini, P., Torrión, J., Cassman, k., Yang, H. and Specht, J. 2015a. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements in the western US Corn Belt. *Field Crops Research*, 179: 150-163.

Grassini, P., van Bussel, L., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M., Cassman, K. 2015b. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research* 177, 49–63.

Hall, A., Rebella, C., Ghera, C., Culot, J. 1992. Field-crop system of the Pampas. In: Pearson, C.J. (Ed.), *Field Crops Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, pp. 413–450.

Kantolic, A.; Giménez, P. y de la Fuente, E. 2003. Ciclo Ontogénico, Dinámica del Desarrollo y Generación del Rendimiento y la calidad en Soja. En: Satorre, E; Benech Arnold, R.;

Slafer, A.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M. y Savin R. Producción de Granos. Editorial Facultad de Agronomía. UBA pp. 167-201.

Kantolic, A., Slafer, G. 2001. Photoperiod sensitivity after flowering and seed number determination in indeterminate soybean cultivars. *Field Crops Research*, 72: 109–118.

Lawn, R., Troedson, R., Garside, A., and Byth, D. 1984. Soybeans in saturated soil - A new way to higher yields. *World Soybean Research Conference Proceedings*. Ames, Iowa. Iowa State University.

Lobell, D., Cassman, K., Field, C. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes and Causes. *The Annual Review of Environment and Resources*, 34: 179-204.

Littell, R., Milliken, R., Stroup, W., Wolfinger, R. 1996. SAS system for MIXED models. SAS Institute, Cary, NC.

Martignone, R., Romagnoli, M., Rosbaco, I., Tuttolomondo, G. 2006. Efecto de la fecha de siembra sobre el comportamiento fenológico y agronómico en cultivares de soja de diferentes grupos de maduración. 3º Congreso de Soja Mercosur 2006. Rosario, Argentina.

Mercau, J., Dardanelli, J., Collino, D., Andriani, J., Irigoyen, A., Satorre, E. 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *Field Crops Research* 100: 200-209.

Ministerio de Agroindustria, 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones.

Molino, J., Vega, C., Kantolic, A. 2011. Estrés térmico por alta temperatura en soja (*Glycine max* (L.) Merr.) : Análisis de la dinámica de producción y fijación de vainas y su efecto sobre la determinación del rendimiento. Tesis para obtener el grado de Magister de la Universidad de Buenos Aires área Producción Vegetal otorgado por Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. 79 pág.

Nico, M., Miralles, D., Kantolic, A. 2015. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. *Field Crops Research*, 176: 45-55.

RECSO, 2015. Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Soja. Informe técnico de resultados campaña 2014/2015. Convenio de asistencia técnica INTA/ASA. Marcos Juarez, Cordoba, julio 2015. 581 págs.

Salvagiotti, F. 2010. Manejo de soja de alta producción. Para Mejorar la Producción N° 42, EEA INTA Oliveros 57-62.

Santos, D., Ferrari, B., Fresoli, D., Beret, P., Benavidez, R., Vicentini, R., Della Magdalena, M., Mondino, M., Salas, G., Lustig, S., Antongiovani, M., Devani, M., Ledesma, F., Lizondo, M., Erazzu, L., Salines, L., Baigorri, H., Nari, C., Rossi, R., Salado Navarro, L., Dolinkue, J., Wright, R., Curti, L., Sanmartin, O. y de La Vega., A. 2006. Ganancia genética en soja entre 1980 y 2000. 3º Congreso de Soja Mercosur 2006. Rosario, Argentina.

Sinclair, T., Rufty, T. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases not necessarily plant genetics. *Global Food Security*, 1: 94-98.

Specht, J., Diers, B., Nelson, R., Francisco, J., de Toledo, F., Torrion, J. y Grassini, P. 2014. Soybean. In: S. Smith, B. Diers, J. Specht, and B. Carver, editors, *Yield gains in major U.S. field crops*. CSSA special publication 33. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 311–356.

Specht, J., Hume, D., Kumudini, S. 1999. Soybean yield potential a generic and physiological perspective. *Crops Science*, 39: 1560-1570.

Specht, J., and J. Williams. 1984. Chapter 3. Contribution of genetic technology to soybean productivity—Retrospect and prospect. p. 49–74. In W.R. Fehr (ed.) *Genetic contribution to yield gains of five major crop plants*. CSSA Special Publication. 7. CSSA and ASA, Madison, WI.

Van Ittersum, M., Cassman, K., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143-144.

Zhang, Q., Gao, Q., Herbert, S., Li, Y. and Hashami, A. 2010. Influence of sowing date on phenological stages, seed growth and marketable yield of four vegetable soybean cultivars in North-eastern USA. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 5(18), pp. 2556-2562.

ANEXO I

Fotoperiodo promedio (hs) por subperíodo del cultivo de soja, por cultivar (Cu) y fecha de siembra. Años 2009-2010 y 2011-2012.

Cu	Fecha Sbra.	Subperíodo	2009-2010	2011-2012
NA 3731 RG	Te	E-R1	14,6	14,8
		R1-R5	15,1	15,1
		R5-R7	14,5	14,1
	I	E-R1	15,1	15,1
		R1-R5	14,8	14,7
		R5-R7	14,0	13,4
	Ta	E-R1	14,6	14,8
		R1-R5	13,9	14,1
		R5-R7	13,0	13,1
DM 4670 RR	Te	E-R1	14,6	14,8
		R1-R5	15,0	15,0
		R5-R7	14,3	14,2
	I	E-R1	15,1	14,8
		R1-R5	14,8	15,1
		R5-R7	13,8	13,7
	Ta	E-R1	14,6	14,7
		R1-R5	13,8	14,0
		R5-R7	12,8	12,9
DM 5,5i	Te	E-R1	14,8	14,8
		R1-R5	14,9	14,9
		R5-R7	13,8	13,7
	I	E-R1	15,0	15,0
		R1-R5	14,5	14,3
		R5-R7	13,4	13,3
	Ta	E-R1	14,4	14,6
		R1-R5	13,5	13,7
		R5-R7	12,6	12,8

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN MAÍZ EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DEL GENOTIPO

3.1 Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es una gramínea que responde a días cortos, su metabolismo C4 le confiere una mayor eficiencia de conversión de la radiación en comparación a una planta con metabolismo C3 (Sinclair et al., 1989). Esta elevada eficiencia de conversión le permite una buena producción de biomasa lo cual se traduce en altos rendimientos cuando crece en condiciones favorables para el cultivo. Por otro lado el número de granos por unidad de superficie es uno de los componentes de rendimiento que mejor explica la variabilidad en el rendimiento del maíz. (Cirilo and Andrade, 1994a; Echarte et al., 2000). El número potencial de granos se define durante el periodo crítico del cultivo (15 días antes y 15 días después de floración, Andrade, 1999), y depende de la condición del ambiente, de las características propias del híbrido y del tamaño final de la espiga (Otegui et al., 1998). En condiciones de secano el rendimiento en grano del maíz dependerá de la oferta de recursos ambientales durante el periodo de definición del rendimiento o período crítico, por lo tanto afectaría principalmente la tasa de crecimiento de la planta y la relación fuente-destino (Gambín et al., 2006, Andrade et al., 2010).

Los incrementos en el rendimiento de maíz desde el siglo pasado se debieron en parte a los avances en el mejoramiento genético y a las mejoras en lo que respecta al manejo del mismo. Debido al fenómeno de heterosis (proceso donde se incrementan los caracteres deseados, como por ejemplo el rendimiento del grano) se obtuvieron híbridos con mejor comportamiento a mayores densidades de plantas y a mayores niveles de fertilización (Duvick, 1977, Echarte et al., 2013). A estas características se sumaron otras como una mayor resistencia a insectos, a estrés hídrico y térmico y una mayor tolerancia a herbicidas. Duvick (1983), utilizó 47 híbridos comerciales liberados entre los años 1930 y 1980 y estimó una ganancia promedio debida a la mejora genética de 92 kg ha⁻¹ año⁻¹ en USA, esta tasa fue lineal y continua, además estimó que el rendimiento promedio para los años 1935, 1955 y 1980 fueron de 4.900, 6.500 y 9.300 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente. Con posterioridad a esta investigación, el mismo autor estableció que el mejoramiento genético contribuyó en las últimas 5 o 6 décadas en menos del 50 % a la ganancia en el rendimiento del maíz y el otro 50 % fue debido a las mejoras en las prácticas de manejo (Duvick, 2005). Otros estudios en

USA, dan cuenta de una tasa de ganancia de $110 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el rendimiento (Troyer, 2000) entre 1960 y 2000. En Canadá, entre 1940 y 2000, observaron una tasa de ca. $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Bruulsema, 2000). China por su parte, tuvo un incremento lineal del rendimiento desde 1960 hasta 1993, con una tasa anual de ganancia del 5 al 8 %, a partir de ahí la tasa se estancó y disminuyó llegando a ser menor al 1 % en los últimos 20 años (Meng, 2013). En Argentina la tasa de ganancia genética obtenida con un modelo cuadrático fue en un primer período de $67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ entre 1979 y 1988, mientras que entre 1989 y 1999 fue de $249 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Eyherabide et al., 2001). Este último incremento fue acelerado principalmente por la incorporación al mercado de híbridos simples (Eyherabide et al., 2001). Estudios realizados en Pergamino (norte Buenos Aires) con híbridos simples liberados desde los años 80 registraron un incremento en la mejora genética del rendimiento en grano del 0,57 % para las siembras tempranas, sin embargo en las siembras tardías se hace casi nulo debido al efecto de compensación entre un mayor número de granos en detrimento de un menor peso individual de los mismos (Cirilo, A. y Otegui, M. 2017).

Atraves de los concursos de rendimiento se estimaron rendimientos potenciales. En Nebraska, registros de estos concursos mostraron rendimientos máximos de hasta $18.200 \text{ kg ha}^{-1}$ bajo sistemas de riego (Duvick & Cassman, 1999), demostrando que no hubo grandes cambios en los últimos 25 años. Grassini et al. (2011) mediante el uso de modelos de simulación de cultivos estimaron el rendimiento potencial del área maicera de Nebraska en $15.400 \text{ kg ha}^{-1}$ y determinaron una brecha de rendimiento (diferencia entre Rendimiento Potencial (RP) y Rendimiento Actual (RA) de ca. 21 % sin variaciones desde el año 2003. En el noreste de China Lv et al. (2015) mediante el uso del modelo de simulación APSIM estimaron un RP de $15.100 \text{ kg ha}^{-1}$ (dato promedio desde 1961 a 2009), una brecha del 66,2 % entre el RP y RA y del 54 % entre el Rendimiento limitado por agua (RAs) y el RA. En este estudio se observó una mayor disminución de las brechas entre el RAs y RA que entre el RP y el RA. En Argentina, según datos reportados de concursos de rendimiento en el sur de Santa Fe entre los años 2000 al 2003 observaron los máximos rendimientos obtenidos correspondieron a $16.580 \text{ kg ha}^{-1}$ en seco y a $17.500 \text{ kg ha}^{-1}$ bajo riego (Damen et al., 2003). En los últimos diez años el promedio nacional de rendimiento de maíz fue de 6.600 kg ha^{-1} , y en la provincia de Santa Fe fue de 7.700 kg ha^{-1} (Ministerio Agroindustrias, 2017). En los últimos años se incorporó a los sistemas de producción de la zona pampeana el maíz tardío con rendimientos máximos que rondan los 11.000 a $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ en condiciones de seco (Prieto et al., 2011; Ferraguti et al., 2014). El atlas de brechas de rendimiento (Aramburu Merlos et al., 2015) estimó la brecha entre el RP y el RA en un rango entre el 30 y 40 %, y entre el RAs y el RA en un rango entre 20 y 30 % para el sur de Santa Fe, en tanto

que hacia el suroeste de Córdoba y Norte de Buenos Aires estas brechas oscilaron en un 50-60 % y entre un 40-50 %.

En base a lo antes expuesto y teniendo en cuenta los factores ambientales que favorecen a una mayor producción de granos es importante determinar las variaciones del rendimiento potencial y las brechas posibles de explotar, dentro de un área delimitada, frente a distintas combinaciones de manejo (cambios en la fecha de siembra, dosis de fertilizantes, densidad siembra) con la tecnología disponible.

Hipótesis

Bajo las condiciones agroecológicas del centro-sur de Santa Fe se hipotetiza que:

2a) el rendimiento potencial en el cultivo de maíz se maximiza en las fechas de siembras tempranas independientemente del híbrido respecto a las fechas intermedias y/o tardías, debido a una mayor oferta de radiación solar.

2b) las brechas entre rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable en secano del maíz son menores en la medida que se atrase la fecha de siembra condicionado por un régimen hídrico más favorable para el crecimiento del cultivo.

2c) el número de granos por espiga del maíz es el componente numérico que mejor explica estas brechas.

Objetivos Específicos

Cuantificar las variaciones de los rendimientos potenciales (RP), los máximos rendimientos en condiciones de secano (RAs) y la brecha de rendimiento entre ellos en el cultivo de maíz con el atraso en la fecha de implantación para diferentes genotipos en experimentos a campo.

Analizar los cambios en los principales componentes numéricos que expliquen estas brechas de rendimiento.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1. Descripción del sitio Experimental, diseño y manejo

Se realizaron dos experimentos en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros, Santa Fe (32°33'S-60°51'W) durante los años 2009-2010 y 2010-2011. El suelo fue un Argiudol Típico serie Maciel, con más de 40 años de historia agrícola. Se evaluaron tres híbridos de alto potencial de rendimiento (Albrecht et al., 2008; 2009): un ciclo intermedio Tardío (AX 878), ciclo Intermedio (AX 886) y ciclo largo completo (NK 900) en tres fechas de siembras: temprana (Fs Te), Intermedia (Fs I) y tardía (Fs Ta) (Tabla 3.1).

En la zona de estudio normalmente estos genotipos son sembrados a partir de la primera quincena de septiembre hasta mediados de octubre en función de la temperatura media del suelo (mayor a 15°C) y de la disponibilidad de agua en el perfil. Estas fechas se consideran como siembras de primera, en tanto que en siembras tardías se consideran a partir de diciembre hasta la primera semana de enero, donde se optan por ciclos cortos a intermedios, tratando de evitar las heladas tempranas que afectarían el llenado de los granos (Madonni, 2009).

Cada combinación de híbrido por fecha de siembra fue analizada bajo riego (R) y en seco (S). En el primer año y para las tres fechas de siembra, el cultivo antecesor fue soja de primera luego un barbecho largo, en tanto que en el segundo año fue maíz de primera y barbecho.

Las parcelas se sembraron en siembra directa a 0,52 m de distancia entre líneas (es el distanciamiento con mayor adopción en la zona), con una densidad de siembra de 4 a 4,5 semillas por metro lineal en el tratamiento con riego y 4 semillas por metro lineal en el tratamiento en seco de la Fs Te e I, mientras en que en la Fs Ta se sembró con una densidad de 3,5 a 4 semillas por metro lineal para los dos tratamientos. El tamaño de cada unidad experimental fue de 52 m² (2,6 m de ancho por 20 m de largo). A la siembra se fertilizó con 18 Kg ha⁻¹ de fósforo (80 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico en los dos años). La fertilización con nitrógeno fue diferente para cada tratamiento: para el tratamiento regado se estableció una dosis de 155 kg N ha⁻¹ aplicados en dos momentos (siembra y refertilización en V5-V6) mas 110 kg Sulfato de Calcio ha⁻¹ (yeso) a la siembra. Para el tratamiento en seco la dosis fue de 100 kg N ha⁻¹, aplicados a la siembra, utilizándose Urea como fuente nitrogenada.

La humedad inicial del suelo para las Fs Te del 2009-2010 fueron de 186, 258 y 294 mm de agua hasta los dos metros de profundidad (las mediciones de agua inicial se realizaron por gravimetría) representando casi un 62, 86 y 98 % de agua útil disponible para

el cultivo. Para el 2010-2011, el contenido inicial de agua fue de 222 mm en las Fs Te e I y de 237 mm en la Fs Ta, representando el 74 y 79 % de agua útil en el suelo disponible para el cultivo al momento de la siembra.

El tratamiento bajo riego se condujo con un sistema de riego por goteo dispuesto de igual manera que para el de soja (Capítulo 2). Los datos respecto a la cantidad de riegos aplicado en maíz se perdieron, sin embargo se aplicó el mismo criterio que en soja, es decir se procedió a tratar de mantener la humedad del perfil por encima del 60 % de agua útil, teniendo en cuenta la información de la sonda de neutrones y la frecuencia de las precipitaciones. El diseño experimental utilizado fue en bloques al azar con tres repeticiones. Durante el ciclo, el cultivo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades.

Tabla 3.1 – Fechas de siembra del cultivo de maíz en la EEA INTA Oliveros. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Fecha de Siembra	Año 2009-2010	Año 2010-2011
Te	15-09-2009	20-09-2010
I	21-10-2010	25-10-2010
Ta	09-01-2010	21-12-2010

3.2.2. Muestreos y Determinaciones en planta

Se registró el estado fenológico del cultivo semanalmente sobre una muestra de 20 plantas al azar determinándose la emergencia (E), inicio de floración (R1) y madurez fisiológica (R6) (Ritchie y Hanway, 1982). Para la determinación del estado de madurez fisiológica en forma más precisa se realizaron muestreos desde grano pastoso (R4) con una frecuencia de dos veces por semana, extrayendo dos espigas al azar de cada parcela y sacando cincuenta granos del centro de la espiga, estos granos fueron llevados a estufa a 60 °C hasta peso constante. Con estos datos se realizó la curva de llenado de granos utilizando el software TBL Curve (Jandel, 1991), determinándose la tasa de llenado y el momento en que el mismo cesaba utilizando el modelo de línea del plateau (i.e. R6).

En madurez fisiológica se determinó la biomasa aérea total en una muestra de 1 m² de superficie. De esta muestra se determinó el peso fresco total. Posteriormente se separaron las estructuras vegetativas (hojas y tallos) de las reproductivas (espiga y granos). Las mismas fueron secadas en estufa a 60°C hasta peso constante. Se calculó el índice de

cosecha (IC) como el cociente entre el peso seco de los granos y el total de biomasa aérea en R6.

En madurez de cosecha se determinó el rendimiento en semilla con cosechadora experimental en una superficie de 5 m², el cual fue ajustado al 14 % de humedad. Se contó el número de espigas por unidad de superficie y se determinó el peso individual del grano a partir de una muestra de 200 semillas. Con ésta información se obtuvo el número de granos por metro cuadrado (NG) y el número de granos por espiga (NGE). Para cada fecha de siembra se calcularon las brechas de rendimiento y de sus componentes numéricos determinados por la diferencia entre el rendimiento potencial (RP: tratamiento con riego) y el rendimiento limitado por agua (RAs).

3.2.3. Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad diaria de agua en el suelo se calculó mediante el software Balance Hídrico de Cultivos Extensivos (BAHICU versión 1,02) en el Híbrido AX 886 en las tres fechas de siembra. El funcionamiento del programa esta explicado en el capítulo 2. En este capítulo se presentan los balances de agua en el suelo sin los riegos, ya que si bien fueron realizados pero los datos se perdieron al momento de la redacción.

3.2.4. Registros de Variables Agrometeorológicas

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la Estación Agro-meteorológica perteneciente a la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros. Se calculó el fotoperiodo promedio y los grados días acumulados por híbrido y fecha de siembra, desde emergencia (E) hasta floración (R1) y desde R1 hasta R6 (madurez fisiológica). Los grados días acumulados se obtuvieron de la sumatoria térmica proveniente de la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura de base, que en el caso del maíz es de 8 °C (Ritchie, 1991) durante la etapa vegetativa y de 0°C a partir de floración hasta madurez fisiológica (Muchow, 1990).

Para un mejor análisis de los datos de precipitaciones y de radiación solar incidente acumuladas se dividió el ciclo del cultivo en tres subperíodos: i) E-PcR1, ii) PcR1 y iii) PcR1-R6. El primer subperiodo representaría la etapa vegetativa del cultivo desde emergencia hasta el período crítico (15 días antes floración), el segundo corresponde a la etapa crítica alrededor de floración (15 días pre y post floración) y el tercer subperiodo es la etapa de llenado de granos hasta alcanzar madurez fisiológica. En los tres subperíodos se realizó el cálculo del fotoperiodo, las temperaturas máximas y mínimas y el promedio histórico correspondiente para cada subperiodo analizado. Además se calculó en cada año,

por fecha de siembra y por híbrido el promedio y los cuartiles 25 y 75 de las precipitaciones acumuladas y de la radiación solar incidente acumulada de la serie histórica de 40 años de la Estación Agro-meteorológica (1971 - 2011).

3.2.5. Análisis Estadístico

Las variables meteorológicas (temperatura y fotoperiodo) y la fenología se analizaron en forma descriptiva.

Los datos correspondientes a rendimiento y sus componentes fueron analizados mediante un análisis de la varianza (ANAVA) utilizando el procedimiento Proc Mixed (Littel, 1996) del sistema estadístico SAS considerando como efectos fijos: año, fecha de siembra, genotipo y disponibilidad hídrica mientras que a la repetición/bloque se consideró como efecto aleatorio. Se analizaron las interacciones, en el caso de las interacciones de orden n si no eran significativas se procedió a analizar al nivel n-1 y así sucesivamente. Cuando las diferencias de medias eran significativas en el ANAVA, se les aplicaban el test de diferencias mínimas significativas (DMS) con un nivel de significancia de un 5%.

3.3 Resultados

3.3.1 Fenología

El fotoperiodo promedio del ciclo del cultivo por fecha de siembra de ambos años evaluados fue de 14,6 hs en la Fs Te, 14,8 hs en la Fs I y de 13,4 hs en la Ta. Esta Fs Ta fue menor entre un 8 y 9 % respecto a las Fs Te e I (Anexo II). Estos resultados condicen con el atraso en la fecha de floración del 2010-2011 (Tabla 3.2).

Se observaron en ambos años diferencias en la duración de días en la etapa desde emergencia hasta floración entre los híbridos en cada fecha de siembra de alrededor de dos a tres días (Tabla 3.2). En la Fs Te del 2009-2010, el híbrido con mayor duración en todo el ciclo fue NK 900 con 120 días, le siguió AX 878 con 119 días y por último AX 886 con 118 días. Mientras que en la Fs I del mismo año el ciclo total en los tres híbridos fue menor (99 días en AX 878 y AX 886, y 107 días en NK 900) que en la Fs Ta (102, 100 y 104 días para AX 878, AX 886 y NK 900). En el 2010-2011 se observó una mayor duración del ciclo del cultivo en las tres fechas de siembra por un incremento en los días de la etapa desde emergencia a floración respecto al año anterior (Tabla 3.2), acortando la siguiente etapa, desde floración a madurez fisiológica, particularmente en las Fs Te y Ta. Esto fue disminuyendo al atrasar la siembra, con un promedio del ciclo E-R6 de: 124, 111 y 106 días

vs. 121, 101 y 102 días en 2009-2010 para Fs: Te, I y Ta respectivamente. Por otro lado, éste segundo año se caracterizó por alcanzar una mayor acumulación de grados días (GDD) en todo el ciclo del cultivo (Tabla 3.2) y en las tres fechas de siembra. De esta manera, la etapa E-R1 acumuló en promedio entre 945 a 967 GDD en las tres fechas de siembra en 2010-2011, mientras que en el año anterior el promedio varió desde 862 a 878 GDD según el genotipo. En tanto la etapa R1-R6 en 2009-2010 los GDD acumulados fueron: 1.312 en la Fs Te, 1.035 y 1.139 GDD en las Fs I y Ta. En el 2010-2011 los valores fueron menores en la Fs Te (1.262 GDD) y mayores en las Fs I y Ta respecto del año anterior (1.220 y 1.152 GDD respectivamente).

3.3.2 Disponibilidad de Recursos

3.3.2.1. Disponibilidad de agua

Las precipitaciones acumuladas desde septiembre hasta mediados de abril en el 2009-2010 fue de 1.068 mm (el 61 % del total de lluvias se concentraron entre diciembre, enero y febrero), en tanto que en el 2010-2011 este valor fue de 832 mm (con el 68 % de las lluvias distribuidas entre febrero y marzo 2011).

En el primer subperiodo correspondiente a la etapa vegetativa previa a floración (E-PcR1) del 2009-2010 las diferencias del aporte de lluvias en las Fs Te e I para los tres híbridos fueron mínimas (en promedio: 155,5 y 163 mm respectivamente), y además fueron menores a la serie histórica (192 y 177 mm). En cambio en la Fs Ta, para esta misma etapa, el aporte de agua para NK 900 superó en un 20 % a los otros dos híbridos, un 31 % al promedio histórico de 40 años y un 3 % al percentil 75 (Figura 3.1a). En el 2010-2011, para el mismo subperiodo, no hubo diferencias en los aportes de agua por precipitaciones entre híbridos y para cada fecha de siembra. Se exceptúa AX 878 en la Fs Te con 82,1 mm, el resto registró lluvias de 92,2 mm, sin embargo ninguno de los tres híbridos superó al promedio histórico y al percentil 25, mientras que en las Fs I y Ta estos valores en promedio fueron 97 y 98,5 mm, representando un 52 y un 35 % menos respecto al promedio histórico de la zona (198 y 150 mm, Figura 3.1b) y por debajo del percentil 25.

Durante el subperiodo crítico (PcR1) de la Fs Te del 2009-2010 el híbrido NK 900 recibió una mayor cantidad de precipitaciones (331,5 mm) en comparación a los otros dos híbridos (274 y 290 mm respectivamente) superando al promedio histórico en un 60 % y en un 24 % al percentil 75 (Figura 3.1a). En cambio en esta misma fecha de siembra Te del siguiente año de tesis (2010-2011), el subperiodo crítico recibió en promedio 72 mm de agua de lluvia (esto representa un 77 % menos respecto al año anterior), y fue inferior al promedio

histórico en un 46 % (131 mm). Dentro de la Fs I del 2009-2010 este período de definición del rendimiento se caracterizó por tener una mayor acumulación de lluvias variando entre los tres híbridos en un rango desde los 330 a 340 mm. Estos montos superaron en 258 mm al aporte de agua recibido en el mismo periodo durante 2010-2011, y en 233 mm al promedio histórico de 40 años, lo que significa un 70 % más de aportes (Figura 3.1a y b).

Tabla 3.2. Duración de las etapas (días) y los grados días acumulados (GDD) en el cultivo de maíz por subperiodo: emergencia a floración (E-R1) y de floración a madurez fisiológica (R1-R6) según fecha de siembra e híbrido. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Año	Hib.	Fs	Días						Grados Días (GDD)					
			2009-2010			2010-2011			2009-2010			2010-2011		
			E-R1	R1-R6	R1-R6	E-R1	R1-R6	R1-R6	E-R1	R1-R6	E-R6	E-R1	R1-R6	E-R6
		Te	65	55	120	75	48	123	859	1445	2304	953	1254	2207
AX 878		I	57	42	99	61	48	109	868	1069	1937	940	1199	2139
		Ta	48	54	102	52	52	104	863	1116	1979	931	1131	2062
		Te	66	54	120	76	50	126	874	1138	2012	966	1300	2266
AX 886		I	57	42	99	63	49	112	868	1069	1937	972	1222	2194
		Ta	47	53	100	53	52	105	846	1155	2001	946	1128	2074
		Te	68	53	121	77	47	124	903	1353	2256	981	1234	2215
NK 900		I	59	48	107	62	50	112	884	968	1852	956	1238	2194
		Ta	49	55	104	54	56	110	879	1146	2025	960	1198	2158

Considerando el mismo subperiodo alrededor de floración en la Fs Ta se observó que el año 2010-2011 presentó una mayor acumulación de agua de lluvias (en promedio recibieron 220,1 mm de agua) respecto al año anterior de tesis, no hubo diferencias entre los híbridos y el monto superó a la misma Fs del 2009-2010 en un 70 %, al registro histórico en un 37 % (139 mm) y en un 9 % al percentil 75. (Tabla 3.2 a y b).

La Figura 3.1a muestra que el subperiodo correspondiente a la etapa de llenado de granos (PcR1-R6) de la Fs Te del 2009-2010 fue donde se acumuló una mayor cantidad de agua de lluvia en comparación a las otras dos fechas de siembra, recibiendo AX 878 311

mm mientras que AX 886 y NK 900 recibieron aportes menores (259 y 249 mm respectivamente). En el 2010-2011, para esta misma fecha de siembra, el híbrido AX 886 fue el único que recibió precipitaciones superiores al promedio histórico (46 % más) durante el subperiodo PcR1-R6 (258 vs 141 mm, Figura 3.1b). En cuanto a la Fs I del 2010-2011 los mayores picos de precipitaciones (193 a 250 mm) se dieron en este tercer subperiodo en los tres híbridos (PcR1-R6, Figura 3.1b) superando inclusive al 2009-2010 en un promedio entre 30 % (163 mm) y un 33% (155 mm) a la serie histórica de 40 años (Figura 3.1a y b).

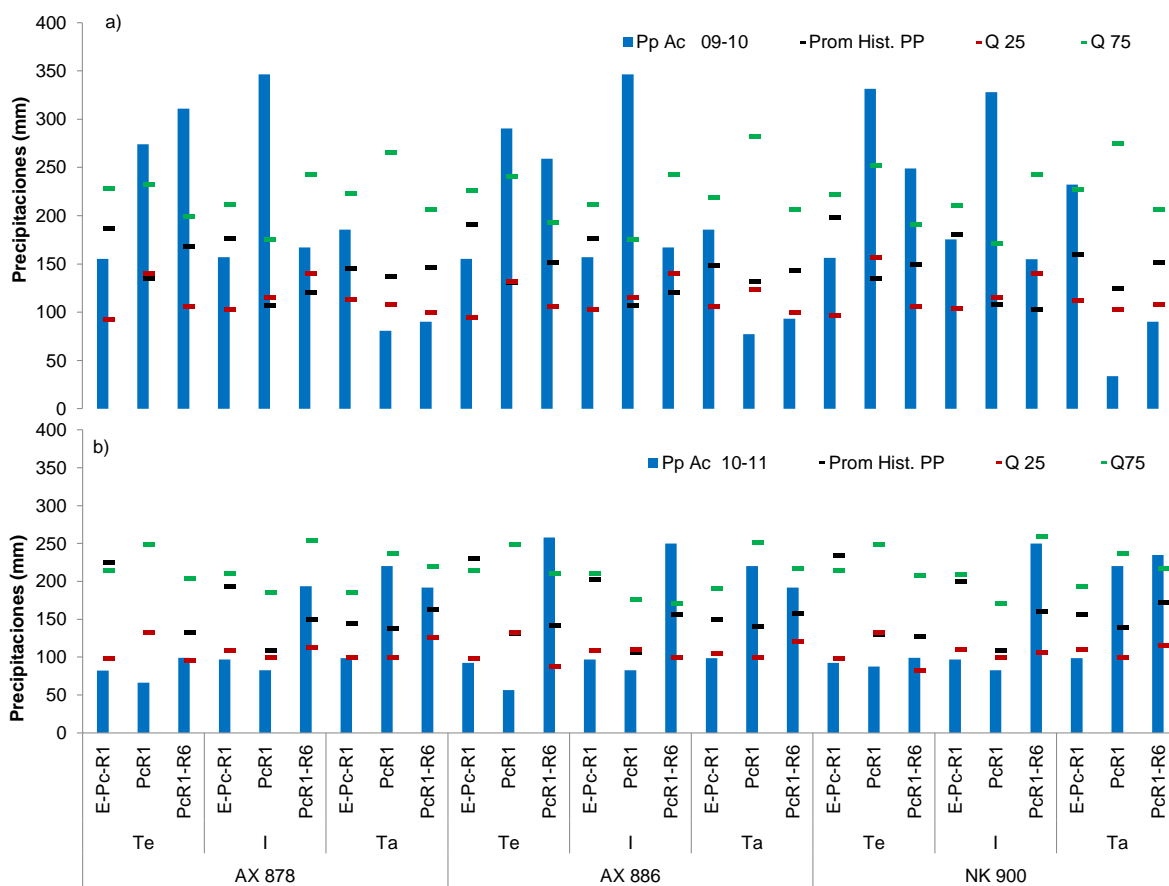


Figura 3.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 para tres híbridos de maíz en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2010-2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

Respecto a la fecha de siembra tardía del año 2010-2011 acumuló un 56 % más de agua que el 2009-2010, superando a la serie histórica en un 21 % pero manteniéndose por debajo del percentil 75.

3.3.2.2. Oferta de Radiación

En ambos años la Fs Te fue la que mayor radiación incidente acumuló respecto a las otras dos Fs, siendo mayor en el año 2010-2011 respecto del 2009-2010 (2.732 vs. 2.543 Mj m^{-2}).

Durante el subperiodo vegetativo (E-PcR1) del 2009-2010, en la Fs Te la oferta de radiación en promedio fue de 1.085 Mj m^{-2} similar al registro histórico (1.086 Mj m^{-2}) e inferior al percentil 75 (1.346 Mj m^{-2}), mientras que en el 2010-2011 la Fs Te no presentó diferencias con el promedio histórico (1.280 vs. 1.272 Mj m^{-2}), pero fue un 20 % inferior al percentil 75 (Figura 3.2b). En las Fs I y Ta los mayores valores de radiación de este subperiodo se dieron en el 2010-2011, siendo en promedio 1.070 y 955 Mj m^{-2} respectivamente superando además en 228 y 198 Mj m^{-2} a las Fs I y Ta del 2009-2010. (Figuras 3.2a y b).

En el subperiodo PcR1 del 2009-2010 la radiación acumulada tanto en la Fs Te como la I se mantuvieron siempre por debajo del registro histórico (570 y 603 vs. 695 y 704 Mj m^{-2} , Figura 3.2a). Mientras que en el 2010-2011 esta Fs superó a la del año anterior en 117 Mj m^{-2} , en tanto que en la Fs Ta de ambos años las diferencias fueron de un 6%.

Respecto al período de llenado de granos (R1Pc-R6) del 2009-2010 la Fs Te acumuló una mayor cantidad de radiación (887 Mj m^{-2}) que el año 2010-2011 (741 Mj m^{-2}), pero fue menor al promedio de la serie histórica (955 Mj m^{-2} , Figura 3.2a). En la Fs I el año 2010-2011 superó al 2009 en 192 Mj m^{-2} pero no así al percentil 75 (747 vs. 920 Mj m^{-2}). Por último en la Fs Ta de este subperiodo en 2010-2011 la radiación incidente superó al 2009-2010 (663 Mj m^{-2} vs 608 Mj m^{-2}), e incluso al promedio histórico de 40 años (602 Mj m^{-2} , Figura 3.2b).

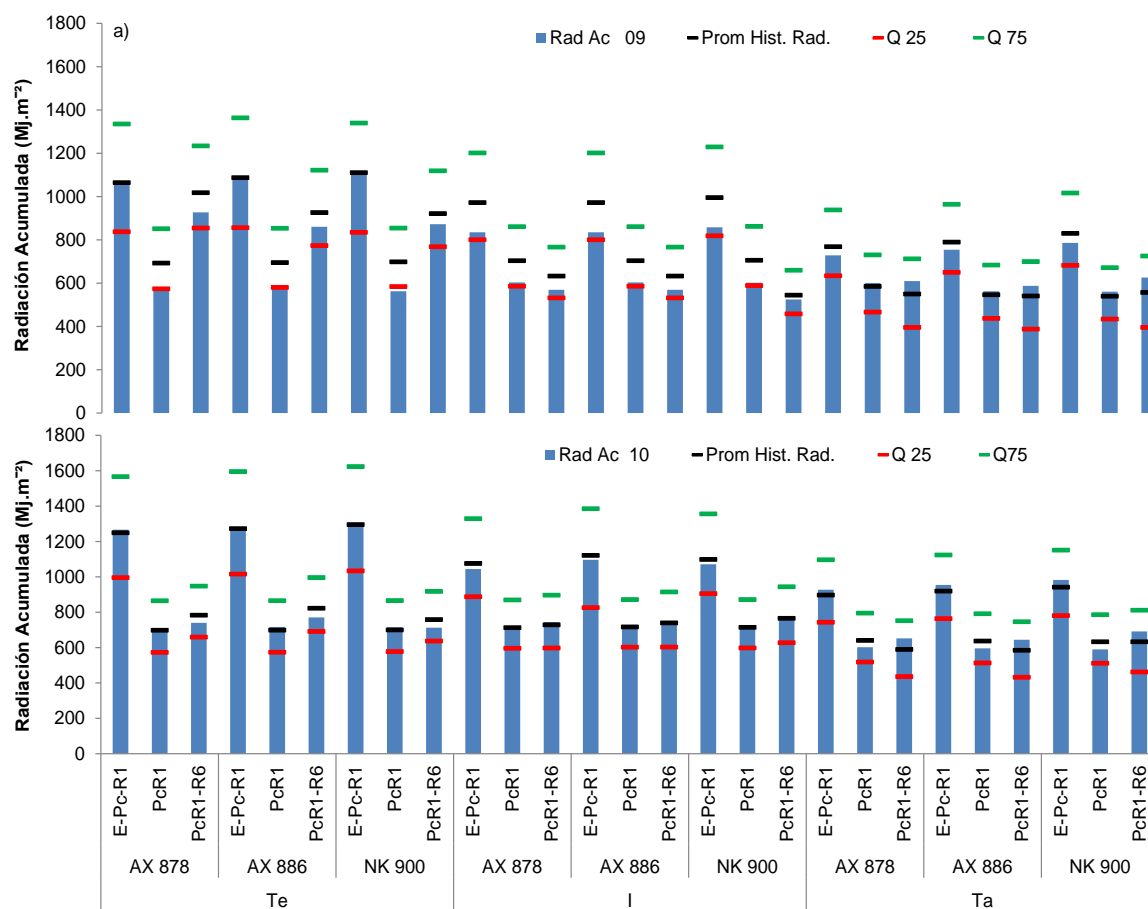


Figura 3.2. Radiación solar acumulada (Mj m^{-2}) durante los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 para tres híbridos de maíz en tres fechas de siembra en los años 2009-2010 (a) y 2010-2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

3.3.2.3. Temperatura

Las temperaturas máximas, como promedio del ciclo total del cultivo por fecha de siembra del año 2010-2011 fueron mayores a las del 2009-2010 para las tres fechas de siembra con una diferencia de 2,2 (Te), 1,5 (I) y 0,6 °C (Ta), y superiores al promedio histórico en un 6 %.

Para el subperiodo E-PcR1 las Fs Ta e I fueron las que tuvieron temperaturas medias máximas mayores en los dos años evaluados (31,7 y 27,3 °C en el 2009-2010 vs. 33 y 29,1 °C en 2010-2011) y superaron a la media histórica entre un 9 y un 1%.

Con respecto al subperiodo crítico del cultivo (PcR1), el 2010-2011 tuvo temperaturas medias máximas por encima de los 30 °C en las Fs Te e I, mientras que en el 2009-2010 la Fs Ta alcanzó estos valores con más de 30 °C, quedando el promedio histórico por debajo de los mismos (Tabla 3.3).

En el tercer subperiodo (PcR1-R6) las mayores temperaturas medias máximas se dieron en la Fs Te e I del 2009-2010 (31,1 – 32,4 °C). En el 2010-2011, la Fs Te presentó las temperaturas medias máximas mayores (32,6 °C), mientras que en la Fs I la temperatura media máxima fue 1,6 °C menor a la del 2009-2010 y 0,7°C superior al promedio histórico de 40 años. Para este subperiodo la Fs Ta presentó los menores valores en promedio respecto a las otras dos fechas de siembra en los dos años (26,2 °C en el 2009-2010 y 28,1 °C en el 2010-2011).

Las temperaturas mínimas durante la etapa vegetativa fueron menores en las Fs Te e I en la campaña 2010-2011 (13 y 14,8 °C) respecto del 2009-2010 (15 y 17,6 °C) (Tabla 3.3), este efecto sumado a un fotoperiodo mayor pudo haber determinado que en el segundo año de estudio la duración de la etapa vegetativa sea mayor.

En tanto que en el subperiodo crítico (PcR1) las temperaturas mínimas del 2009-2010 se mantuvieron entre los 18 y 18,4 °C para la Fs Te superando al promedio histórico entre un 11 y un 9 % (16,5 a 16,8 °C), en la Fs I fue de 19,5 °C y en la Ta variaron entre 17,7 y 19,4 °C. En el 2010-2011 la temperatura mínima en la Fs Te e I estuvo en el rango de 18 a 19 °C según el híbrido, mientras que en la Fs Ta la temperatura mínima fue de 17,5 °C, siendo superior en un 2 % a la serie histórica de 40 años (Tabla 3.3).

En el subperiodo de llenado de grano (PcR1-R6) las menores temperaturas mínimas se presentaron en la Fs Ta de ambos años (13,7 °C), sin alcanzar el promedio histórico cuyo valor fue 15 °C. En la Fs Te del 2009-2010 la temperatura media mínima fue 0,4 °C superior a la del 2010-2011, y en la Fs I la mínima del 2010-2011 fue de 18,8 °C, siendo un grado menor a la del 2009-2010 y un grado mayor al registro histórico.

Tabla 3.3. Temperatura Máxima (T°C Máx), Mínima (T°C Mín) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx.-T Hist. Mín.), en los subperiodos E-PcR1, PcR1 y PcR1-R6 en tres híbridos de maíz y tres fechas de siembra. Años 2009-1010 y 2010-2011.

Hib	Fecha Sbra	Subperíodo	T°C Máx 2009-2010	T°C Máx 2010-2011	T°C Hist. Máx	T°C Mín 2009-2010	T°C Mín 2010-2011	T°C Hist. Mín.
AX 878	Te	E-PcR1	26,6	26,9	25,6	14,8	13,0	13,3
		PcR1	27,3	32,4	29,4	18,4	17,2	17,0
		PcR1-R6	31,1	32,7	32,8	19,6	19,1	18,3
	I	E-PcR1	27,3	29,0	27,8	17,6	14,7	15,3
		PcR1	29,4	33,8	30,6	19,4	19,2	18,2
		PcR1-R6	31,8	30,5	29,3	19,8	18,6	17,1
	Ta	E-PcR1	31,7	33,0	30,4	20,7	19,4	18,1
		PcR1	30,4	29,3	28,7	17,8	17,7	17,3
		PcR1-R6	26,1	28,4	25,4	13,6	13,8	14,3
AX 886	Te	E-PcR1	26,6	26,9	25,7	14,9	13,0	13,4
		PcR1	27,2	32,2	29,5	18,3	17,1	17,0
		PcR1-R6	31,2	32,3	30,7	19,2	18,9	18,3
	I	E-PcR1	27,3	29,3	27,8	17,6	14,8	15,4
		PcR1	29,4	33,4	30,6	19,4	18,9	18,2
		PcR1-R6	31,8	30,3	29,2	19,8	18,9	17,1
	Ta	E-PcR1	31,7	33,0	30,4	20,7	19,4	18,1
		PcR1	30,3	29,2	28,7	17,7	17,6	17,3
		PcR1-R6	26,4	28,3	25,4	14,2	13,7	14,3
NK 900	Te	E-PcR1	26,8	27,0	25,7	15,2	13,0	13,6
		PcR1	27,1	32,5	29,6	18,3	17,4	17,2
		PcR1-R6	31,5	32,7	30,7	19,4	18,9	18,3
	I	E-PcR1	27,3	29,1	27,8	17,6	14,8	15,4
		PcR1	29,5	33,6	30,6	19,5	19,0	18,2
		PcR1-R6	32,4	30,4	29,6	19,7	18,9	17,4
	Ta	E-PcR1	31,8	33,0	30,3	20,9	19,4	18,1
		PcR1	30,1	29,3	28,6	17,3	17,6	17,3
		PcR1-R6	26,0	27,7	25,0	13,2	13,5	13,8

3.3.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo del 2009-2010 se mantuvo cercano a la capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo en las fechas de siembra temprana e intermedia (figura 3.2a y b), no así en la fecha de siembra tardía donde después de floración comienza a descender la humedad en el perfil hasta por debajo de la curva del límite de estrés, coincidiendo con el periodo de llenado de los granos (Figura 3.2c). En cambio en el 2010-2011 la disponibilidad de agua para el cultivo fue a la inversa del año anterior, es decir la fecha de siembra tardía tuvo mayor humedad disponible en el suelo (Figura 3.3c) a diferencia de las otras dos fechas de siembra que estuvieron desde la etapa vegetativa con estrés hídrico hasta madurez fisiológica (Figura 3.3a y b).

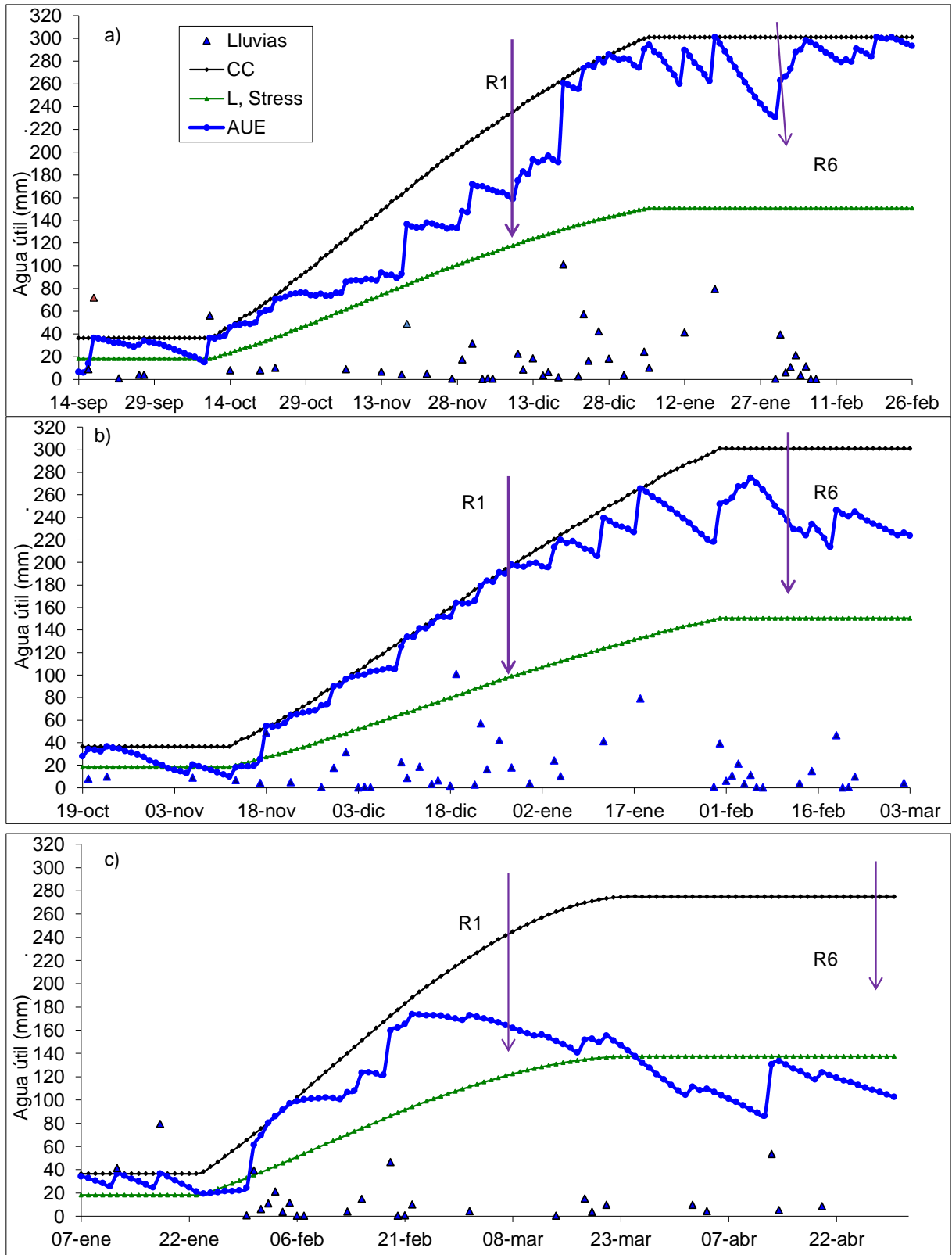


Figura 3.3. Balance Hídrico del suelo (mm) en maíz, híbrido AX 886, fecha siembra temprana (a), fecha siembra intermedia (b) y fecha de siembra tardía (c) en seco, CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración) y R6 (Madurez Fisiológica), año 2009-2010.

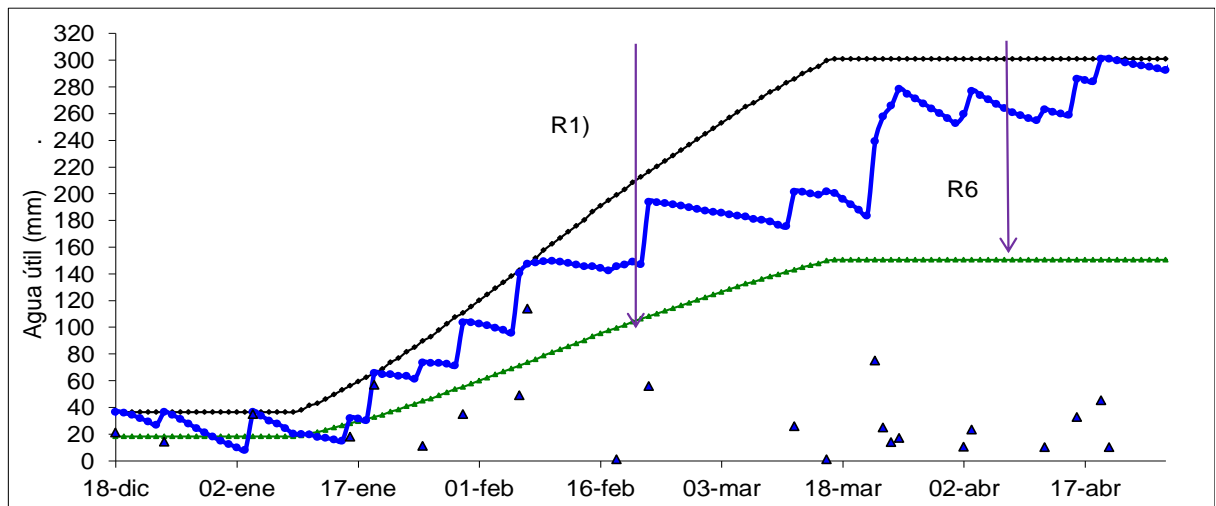
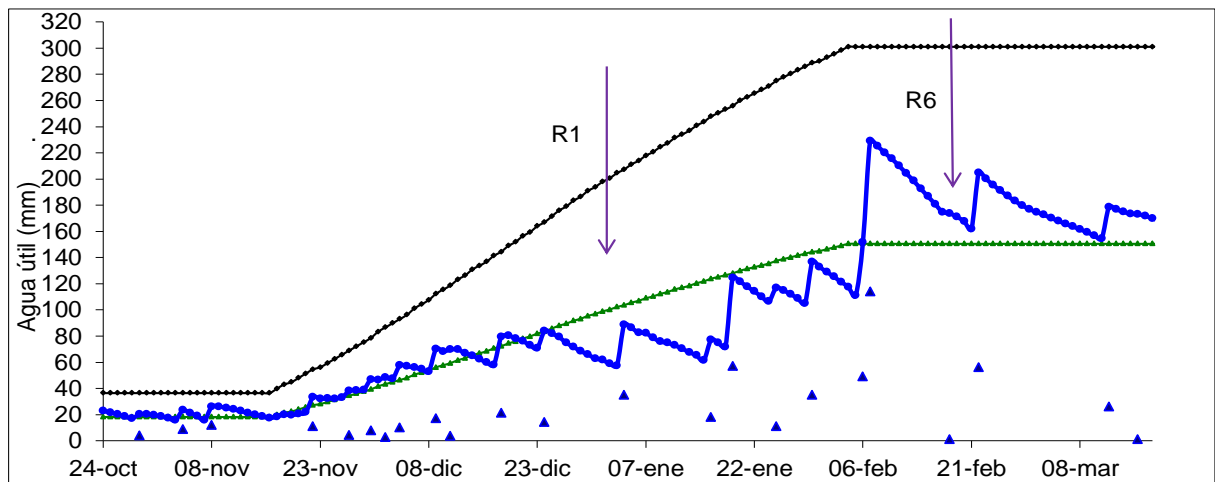
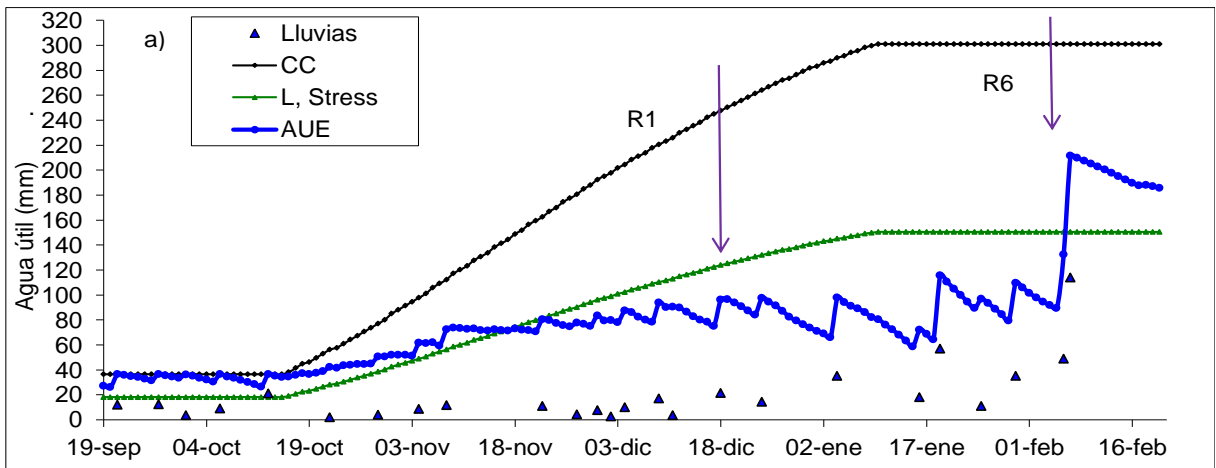


Figura 3.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en maíz, híbrido AX 886, fecha siembra temprana (a), fecha siembra intermedia (b) y fecha de siembra tardía (c) en seco, CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), R1 (Floración) y R6 ((Madurez Fisiológica), año 2010-2011.

3.3.3 Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción

El análisis estadístico de la interacción (año x fecha de siembra x híbrido x riego-secano) en el rendimiento fue significativo ($P=0,05$, Tabla 3.4). El máximo rendimiento alcanzado en condiciones de riego del 2009-2010 se dio en la Fs Te $15.969 \text{ kg ha}^{-1}$ mientras que en el 2010-2011 fue en la Fs I ($14.435 \text{ kg ha}^{-1}$, Tablas 3.5 y 3.6). El rendimiento promedio entre los años 2000 y 2010 en la zona de Oliveros para las fechas de siembra temprana o de primera e intermedia varían entre 4.500 y $14.300 \text{ kg ha}^{-1}$ (Castellarín et al., 2010) y en las siembras tardías entre 6.200 y 9.941 kg ha^{-1} (Ferraguti et al., 2018). Promediando los tratamientos riego y seco, el rendimiento de maíz en la Fs Te del 2009-2010 superó en un 20 % a la Fs I y en un 21 % a la Fs Ta, en tanto que el rendimiento en la Fs I del 2010-2011 fue mayor en un 24 y un 6 % respecto a las siembras Te y Ta del mismo año. Hubo diferencias significativas en rendimientos en la Fs I del 2009-2010 entre los híbridos AX 878 y 886, que rindieron $12.193 \text{ kg ha}^{-1}$, respecto a NK 900 que rindió $15.624 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 3.5a). En el 2010-2011 dentro de la Fs I los híbridos con mayor rendimiento fueron AX 878 y AX 886, que en promedio produjeron $15.213 \text{ kg ha}^{-1}$ diferenciándose significativamente de NK 900 que rindió $12.900 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 3.5b). En la Fs Ta sin restricciones de humedad el cultivo rindió en promedio $13.512 \text{ kg ha}^{-1}$ en el 2009-2010 y $12.617 \text{ kg ha}^{-1}$ en el 2010-2011.

La brecha promedio de rendimiento (diferencia entre rendimiento potencial y máximo alcanzable) en el primer año de evaluación se fue incrementando con el atraso en la fecha de implantación (958 , 1.657 y 2.476 kg ha^{-1} en las Fs Te, I y Ta) en tanto que en el 2010-2011 estas brechas fueron mayores al año anterior, 2.429 , 3.768 y 1.670 kg ha^{-1} , éstos resultados representan una brecha de un 23, 30 y 13% (Fs Te, I y Ta), siendo la Fs Ta la de menor valor en este último año de evaluación. El NG se asoció fuertemente al rendimiento en las tres fechas de siembra ($R^2 = 0.80$, Figura 3.6a). Se observó interacción significativa A x Fs x R-S, FS x H x R-S y A x Fs x H ($P= 0,01$, Tabla 3.4). El máximo NG se logró en la Fs Te del 2009-2010 en el tratamiento regado con 4.429 granos por metro cuadrado y el menor valor fue de 3.521 en el tratamiento en seco de la Fs Ta (Tabla 3.5) en tanto que en el segundo año (2010-2011) el máximo NG obtenido fue en la Fs I con 4.245 granos y el mínimo fue de 2.964 NG de la Fs Te en seco (Tabla 3.6). La brecha entre los tratamientos (diferencia con y sin riego) para el NG en el 2009-2010 fue del 2, 7 y 15 % en las Fs Te, I y Ta, mientras que en el 2010-2011 éstas brechas fueron del 21, 23 y 11 % en las mismas Fs antes mencionadas.

Tabla 3.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha^{-1}), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S). Años 2009-2010 y 2011-2012.

Análisis de Varianza (P<)						
	RTO	NG	BT	PMG	IC	NGE
Año (A)	0.01	0.03	0.05	0.01	0.72	0.03
Fecha sbra (FS)	0.03	0.28	<0,01	0.01	0.17	<0,01
Híbrido (H)	0.86	0.01	0.01	<0,01	0.12	<0,01
Riego-Secano (R-S)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.05	<0,01
A * FS	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0.74	<0,01
A * H	0.01	0.01	0.65	0.04	0.91	0.01
A * R-S	0.01	<0,01	<0,01	0.29	0.80	0.09
Fs * H	0.01	0.01	0.01	0.01	0.16	0.01
Fs * R-S	0.06	0.16	<0,01	0.62	0.63	0.03
H * R-S	0.20	0.11	0.73	0.09	0.48	0.51
A * Fs * H	<0,01	0.01	0.12	<0,01	0.17	<0,01
A * Fs * R-S	0.01	0.01	0.02	0.03	0.81	<0,01
Fs * H * R-S	0.11	0.01	0.82	0.72	0.94	0.11
A * FS * H * R-S	0.05	0.12	0.86	0.01	0.52	0.11

El 58 % de la variación en el rendimiento estuvo explicado por variaciones en el NGE (Figura 3.6b). El número de granos por espiga mostró interacciones año x fecha de siembra x riego y año x fecha de siembra x híbrido significativas ($P < 0.01$, Tabla 3.4). El máximo valor alcanzado bajo riego en el 2009-2010 fue de 574 NGE para la Fs Te y en el 2010-2011 fue en la Fs I con 481 NGE.

Tabla 3.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 14% humedad, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g.), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres híbridos de maíz. (ES= error estándar de la media). Año 2009-2010.

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})		NG (m^{-2})		BT (kg ha^{-1})		PMG (g)		IC		NGE	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
Te	15.969	15.011	4.429	4.340	30.876	28.918	365	342	0.48	0.50	550	549
I	13.336	11.679	4.025	3.758	23.316	21.430	330	310	0.49	0.50	492	455
Ta	13.512	11.036	4.116	3.521	20.850	20.499	328	314	0.50	0.53	481	414
ES	477		140		855		4.6		0.02		10	

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})			NG (m^{-2})			BT (kg ha^{-1})			PMG (g)			IC			NGE		
	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900
Te	15.418	15.970	15.085	4.211	4.547	4.395	27.224	31.796	30.671	372	351	338	0.52	0.48	0.48	545	566	537
I	11.380	11.887	14.256	3.608	3.908	4.159	22.358	21.416	23.346	315	304	342	0.51	0.47	0.50	447	459	515
Ta	12.086	13.246	11.489	3.536	4.062	3.858	19.793	20.166	22.081	341	326	298	0.52	0.51	0.50	407	462	473
ES	584			172			1.048			5.6			0.03			12		
R	14.272			4.190			25.018			341			0.49			508		
S	12.575			3.873			23.616			322			0.50			473		
ES	275			81			494			2.66			0.01			5.6		

La Fs Te del 2009-2010 superó a Fs I y Ta en un 14 y 16 %, en tanto que en el 2010-2011 la Fs I fue la que logró un 5 y un 3 % más de NGE en promedio que las Fs Te y Ta. Entre híbridos el que más se destacó de los tres fue NK 900, con un NGE variable según la

fecha de siembra: 515 y 473 NGE en I y Ta del 2009-2010, 437 y 447 NGE en Te e I del 2010-2011 (Tablas 3.5 y 3.6). La brecha en el NGE del primer año fue mayor en la Fs Ta (14 %) comparado con la FS I (7 %). En la Fs Te no hubo brechas en el NGE. En cambio en el 2010 estas brechas fueron de 15, 20 y 9 % en las Fs Te, I y Ta.

Tabla 3.6. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 14% humedad en maíz, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número de granos por espiga (NGE) con riego (R) y en seco (S) en tres fechas de siembra en Oliveros y tres híbridos de maíz. (ES= error estándar de la media). Año 2010-2011.

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})		NG (m^{-2})		BT (kg ha^{-1})		PMG (g)		IC		NGE	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
Te	10.786	8.357	3.732	2.964	26.112	17.478	300	274	0.48	0.49	433	368
I	14.435	10.667	4.245	3.287	29.257	22.656	340	324	0.47	0.49	467	373
Ta	12.617	10.947	3.933	3.528	23.869	22.483	310	300	0.49	0.52	428	387
ES	342		88		1.143		6.7		0.03		14	

Fecha Sbra	RTO (kg ha^{-1})			NG (m^{-2})			BT (kg ha^{-1})			PMG (g)			IC			NGE		
	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900	878	886	900
Te	9.752	9.409	9.553	3.070	3.356	3.618	19.791	22.202	23.393	302	280	279	0.48	0.49	0.48	367	397	437
I	13.647	12.082	11.924	3.938	3.489	3.861	26.702	23.284	27.883	347	340	309	0.54	0.43	0.46	432	380	447
Ta	11.540	11.588	12.216	3.771	3.707	3.714	22.153	24.273	23.103	306	313	295	0.50	0.53	0.50	428	385	409
ES	419			108			1.400			8.2			0.03			17		
R	12.613			3.970			26.410			317			0.48			442		
S	9.990			3.260			20.872			299			0.50			376		
ES	198			51			660			3.9			0.01			8.10		

El PMG se asoció positivamente con el rendimiento, explicando el 57 % de la variación del mismo (Figura 3.6 d). La interacción A x Fs x H x R-S fue significativa ($P=0.01$, Tabla 3.4). En 2009-2010, el PMG fue en promedio un 7 % superior respecto del 2010-2011.

La Fs Te fue la que mayor PMG promedio tuvo en comparación a las otras Fs I y Ta en el 2009-2010 (un 10 y 9 % más respectivamente), mientras que en el 2010-2011, fue la Fs I que alcanzó el mayor PMG (un 14 y 9 % superior a las Fs Te y Ta). En cuanto a los híbridos, estos variaron en su PMG destacándose AX 878, que en la Fs Te en 2009-2010 alcanzó un peso de 372 g, superando a AX 886 en un 6 % y a NK900 en un 10 %. En cambio en la Fs Ta AX 878 superó en un 5 y un 13 % a AX 886 y a NK 900. En 2010-2011, también AX 878 fue el de mayor PMG en las Fs Te e I (302 y 347 g), mientras que en la Fs Ta el mayor PMG correspondió a AX 886 (306 g) (Tabla 3.6). Las brechas promedio del 2009-2010 fueron del 6 % para las Fs Te e I y del 4 % en la Fs Ta. Mientras que en el 2010-2011 estas brechas fueron del 9, 5 y 3 % en las Fs Te, I y Ta.

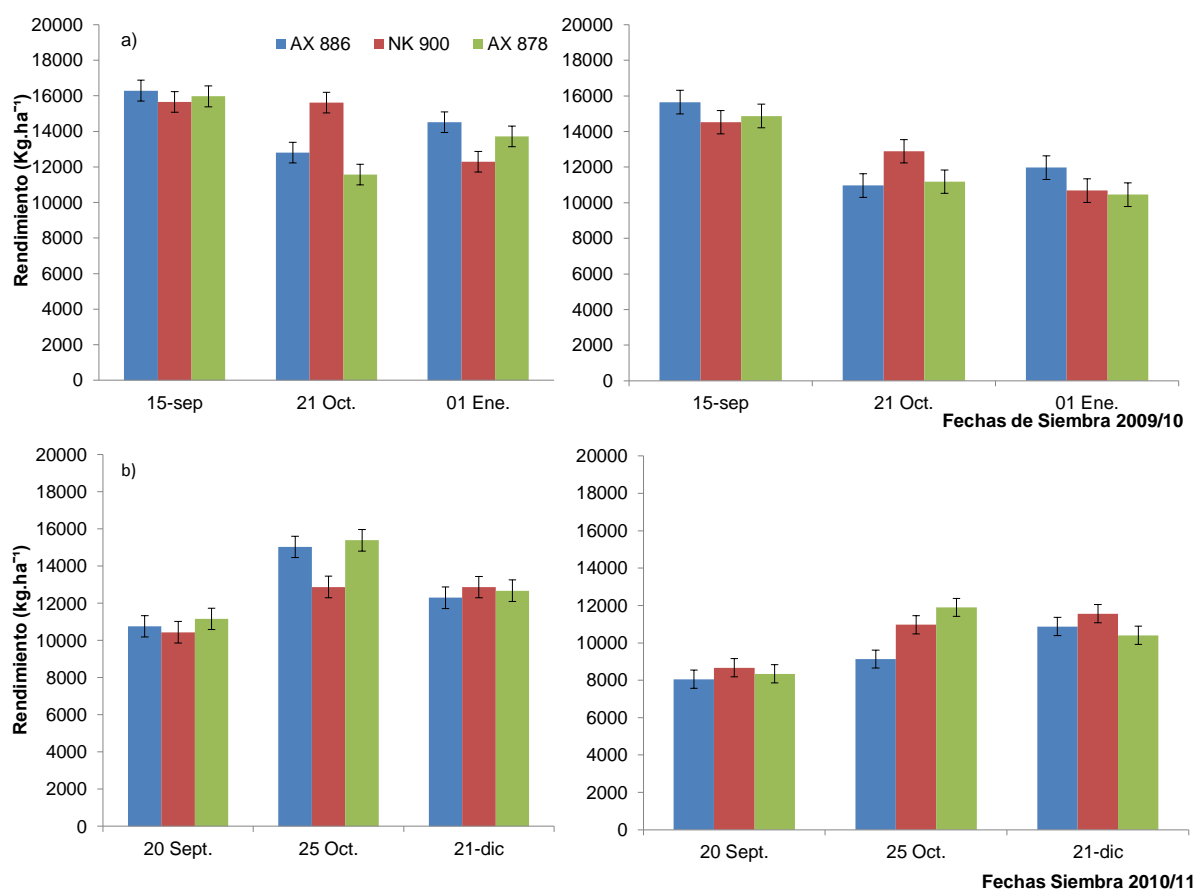


Figura 3.5. Rendimiento de maíz en función de la fecha de siembra en tres híbridos con riego (R) (panel izquierdo) y en seco (S) (panel derecho). Años (a) 2009-2010 y (b) 2010-2011 Las Barras negras representan el error estándar de las medias.

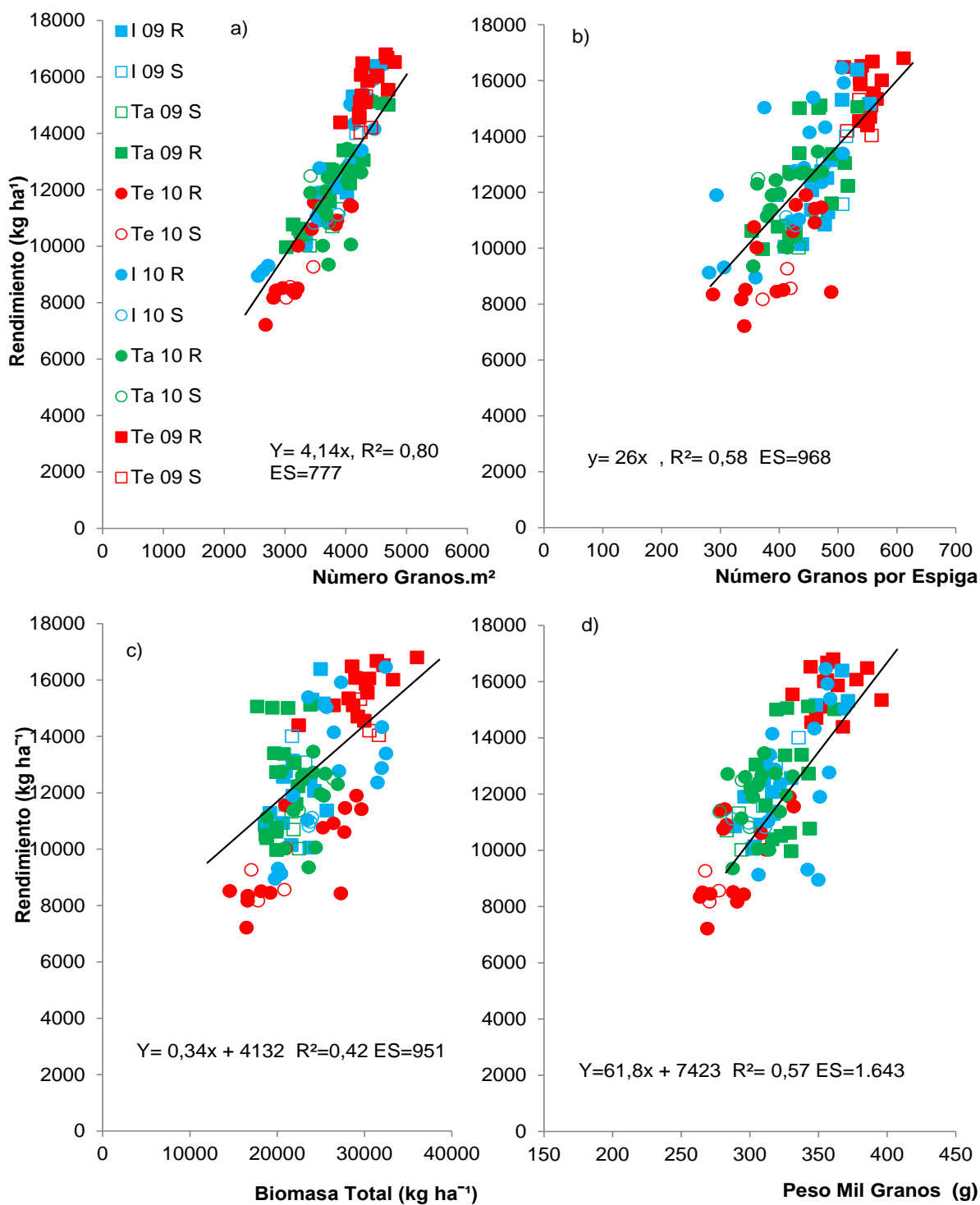


Figura 3.6. Relación entre el número de granos por metro cuadrado (a), el número de granos por espiga (b), la biomasa total (c) y el peso de mil granos (d) con el rendimiento en el cultivo de maíz, en tres fechas de siembra y dos años de evaluación (2009-2010 y 2011-2012). Símbolos llenos tratamientos con riego (R) y símbolos vacíos en seco (S). ES= error estándar de la media.

3.3.3.1 Brechas de Rendimiento y sus componentes

Los valores de las brechas relativas corresponden al promedio por híbrido, por fecha de siembra y por año de los dos años de estudio. La brecha relativa de rendimiento en el 2009-2010 fue mayor en la Fs Ta superando en un 66 y un 35 % a las Fs Te e I. Entre híbridos presentaron diferencias significativas en esta Fs Ta, NK 900 respecto de AX 878 (24 y 13 %, Figura 3.7a panel izquierdo). Las menores brechas de rendimiento se dieron en la Fs Te alrededor de un 6 %. En tanto que la magnitud de las brechas de rendimiento del 2010-2011 fueron mayores en las tres fechas de siembra en comparación al año anterior, siendo la Fs I la de mayor magnitud, un 12 y 48 % superior a las Fs Te y Ta. Dentro de esta Fs I los híbridos se diferenciaron entre sí variando de 15 a 39 % (Figura 3.7a panel derecho).

Las brechas relativas en el NG del año 2009-2010 presentaron similar tendencia respecto a las brechas de rendimiento. La brecha de mayor magnitud en el NG se dio en la Fs Ta, en un rango de 8 a 21 %. Entre los híbridos de esta Fs Ta, el AX 878 se diferenció significativamente (21 %) de los otros dos genotipos (AX 886: 14,3 y NK 900: 8,4 %; Figura 3.7b panel izquierdo). La brecha relativa en el NG del 2010-2011 fue mayor en la Fs Te (20,6 %), en tanto que en la Fs Ta fue menor (10 %).

En la componente del PMG se observaron las menores variaciones de brechas entre las fechas de siembra, de esta manera en el 2009-2010 estas brechas fueron de 6, 5,8 y 5 %, mientras que en el 2010-2011 fueron de 8,6, 4,6 y 3 % correspondientes a las Fs Te, I y Ta respectivamente. En este caso los mayores valores de brechas se dieron en promedio en la Fs Te de los dos años. Dentro de esta Fs Te del 2009-2010, entre los híbridos las diferencias entre los tratamientos riego y seco fueron de 7,7 (NK 900) a 3,3 % (AX 886; Figura 7.3d panel izquierdo). En el 2010-2011 estas brechas en el PMG variaron de 13 % (AX 878) a 5 % (NK 900; Figura 7.3c panel derecho) para la misma Fs Te.

Las brechas obtenidas en el NGE tuvieron la misma respuesta que el rendimiento y el NG en las tres fechas de siembra del 2009-2010, con un rango promedio del 1, 7 y 14 % para las Fs Te, I y Ta. Para el 2010-2011 las brechas fueron de un 15, 20 y 9 % en las Fs Te, I y Ta respectivamente, siendo la Fs I donde se dieron las mayores diferencias entre los tratamientos (R y S). Éstas brechas en el NGE fueron de un 20 % en AX 886, un 29 % en AX 878 y un 11 % en NK 900 (Figura 3.7 d panel derecho) y hubo diferencias significativas entre los híbridos.

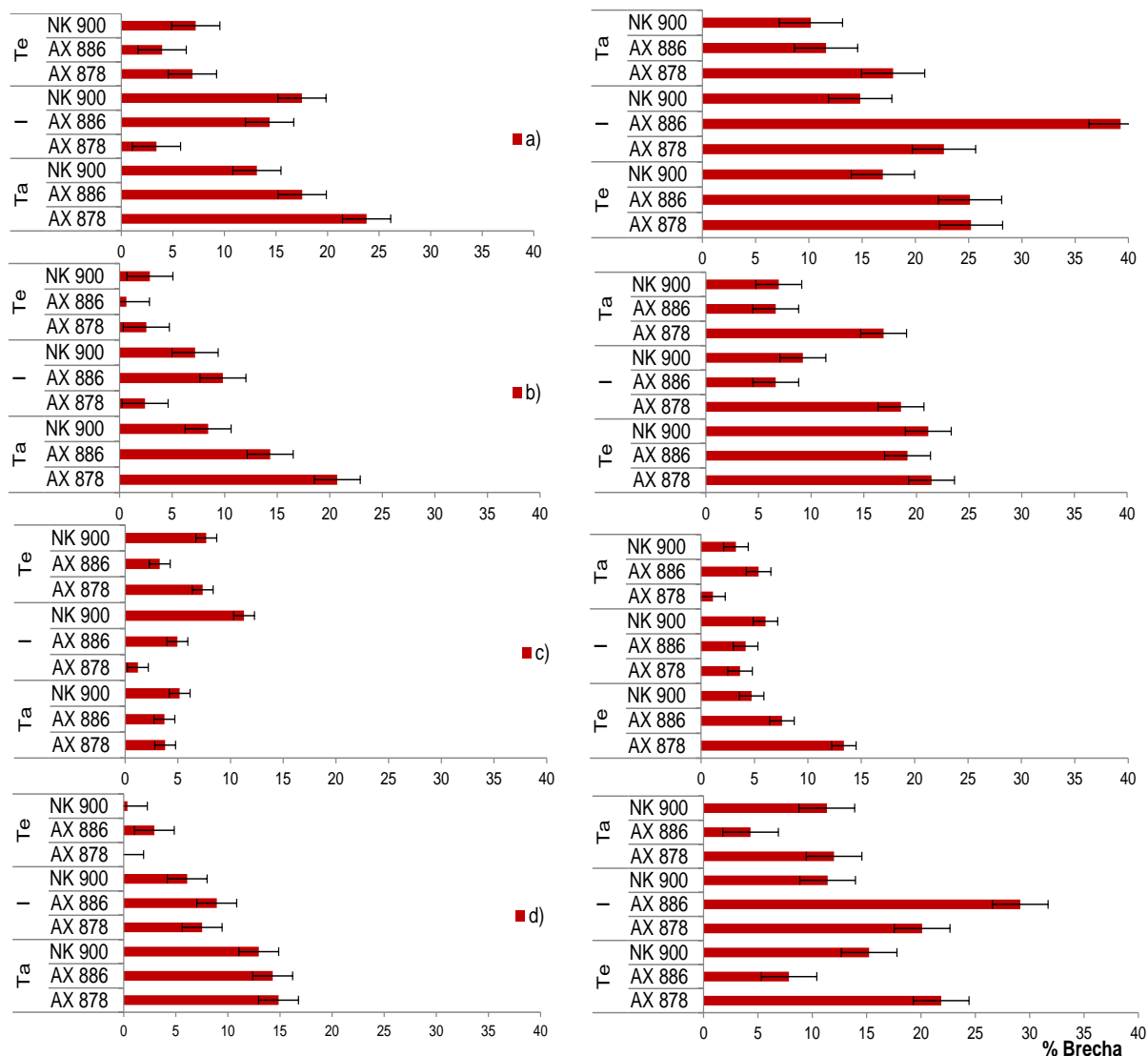


Figura 3.7. Brecha relativa de rendimiento (a), número granos por metro cuadrado (b), peso de mil granos (c) y número granos por espiga (d) en el cultivo de maíz, en función de tres fechas de siembra y tres híbridos. Años 2009-2010 (panel izquierdo) y 2010-2011 (panel derecho).

3.3.3.2 Producción de Biomasa e Índice de Cosecha

La biomasa aérea total producida en R7 se asoció positivamente al rendimiento (Figura 3.6c, $R^2 = 0,42$), observándose la misma tendencia en la respuesta a los factores estudiados. La Fs Te del 2009-2010 el tratamiento regado logró una mayor producción de biomasa ($30.876 \text{ kg ha}^{-1}$) en comparación a las Fs I y Ta donde estas fueron menores (23.316 y $20.860 \text{ kg ha}^{-1}$; Tabla 3.5) y en el 2010-2011 la mayor producción se dió en la Fs I con $29.257 \text{ kg ha}^{-1}$, le siguió la Fs Te con $26.112 \text{ kg ha}^{-1}$ y por último la Ta con $23.869 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabla 3.6). En el análisis entre fechas de siembra se observó que la Fs Te superó en un 25 y un 31 % a las Fs I y Ta del 2009-2010, mientras que la I obtuvo un 16 y un 11% más de biomasa que las Fs Te y Ta del 2010-2011. El híbrido AX 886 en la Fs Te del 2009-2010

fue el de mayor producción de biomasa ($31.796 \text{ kg ha}^{-1}$; Tabla 3.5) mientras que AX 878 lo fue en la fecha de siembra I del 2010-2011 (26702 kg ha^{-1} ; Tabla 3.6). La interacción entre el efecto del año y el efecto del riego, así como el efecto de la fecha de siembra y el riego, fueron altamente significativos ($P < 0,01$; Tabla 3.4). La brecha relativa de producción de biomasa por fecha de siembra fue del orden del 6, 8 y 2 % en la Te, I y Ta del 2009-2010, hallando brechas mayores en 2010-2011 (Te: 33 %, I: 23 % y Ta: 6 %).

El índice de cosecha (IC) fue significativo estadísticamente en el efecto riego (Tabla 3.4), el promedio general del tratamiento regado fue de 0,49 y en seco fue de 0,50 en el 2009-2010 (Tabla 3.5) y de 0,48 y 0,2 en el 2010-2011 (Tabla 3.6). Es de destacar que en la Fs Ta el tratamiento en seco de ambos años tuvo los mayores valores de IC (0,53 y 0,52) respecto a las demás fechas de siembra.

3.4 Discusión

El rendimiento potencial de maíz para el Sur de Santa Fe en fechas de siembra de primera e intermedia, según estimaciones de Grassini y col. (2015) ronda los 13.000 a $14.000 \text{ kg ha}^{-1}$, y el rendimiento máximo alcanzable en condiciones de seco los 11.000 a $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ (Aramburu Merlos et al., 2015; <http://yieldgap.org>). El máximo rendimiento bajo riego obtenido en este trabajo fue mayor a lo indicado en el mapa de brechas de rendimiento en más de 2.000 kg ha^{-1} ($16.393 \text{ kg ha}^{-1}$) al igual que el RAs ($15.645 \text{ kg ha}^{-1}$) en la Fs Te del 2009-2010. En tanto que los rendimientos limitados por agua en promedio de las Fs Ta de los dos años en estudio estuvieron por encima del rendimiento promedio ($11 \text{ mil kg ha}^{-1}$ vs $7-8 \text{ mil kg ha}^{-1}$, Fuente: RIAN, 2014) y coincidieron con los hallados por Prieto et al., 2011 en la localidad Gálvez (centro de Santa Fe) y por Uhart y col. (2017). Estos valores superiores a los rendimientos medios para la zona posiblemente se deban en parte a que el año 2009-2010 se caracterizó por tener una mayor cantidad de lluvias cuya distribución fue más favorable para la Fs Te (durante el periodo crítico alrededor de floración y en la etapa de llenado de granos las precipitaciones acumuladas superaron al promedio histórico de la serie en un 55 % y al cuartil 75 en un 19 %) respecto de Fs I y Ta, por lo que las brechas fueron menores. En tanto que en el 2010-2011, las probabilidades de lluvias para esta misma fecha fueron menores (casi un 50 % por debajo de la serie histórica y del percentil 25). Calviño y col. (2003) mostraron que las mayores variaciones interanuales y espaciales en los rendimientos del cultivo de maíz en seco se centran principalmente en la oferta de agua durante el periodo crítico del mismo. En Oliveros Pedrol y col. (2005) encontraron una alta asociación entre las lluvias comprendidas en los meses de diciembre y

enero con el rendimiento del maíz, coincidiendo con déficit hídricos en la zona para los meses mencionados. Si la disponibilidad de agua no es una limitante, las variaciones serán debidas a la oferta de radiación solar y estarán reguladas por las temperaturas (Muchow, 1990; Andrade et al., 1992). En línea con esto, la Fs Te fue la que acumuló mayor cantidad de radiación solar durante la etapa crítica respecto de las otras dos fechas de siembra, con temperaturas máximas dentro de un rango óptimo (27-28 °C, Totis de Zeljkovich, 1992; Hardacre et al., 1986) beneficiando la tasa de asimilación neta diaria y a la eficiencia en el uso de la radiación. Estas condiciones afectaron positivamente el número de granos por unidad de superficie y el peso de los mismos (Salvagiotti, 2009; Cirilo et al., 1994 a; Cirilo et al., 1994 b). Siguiendo este razonamiento, se puede inferir que los menores rendimientos obtenidos en el siguiente año (2010-2011) correspondientes a los tratamientos bajo riego para esta misma Fs Te se debieron en parte a que el cultivo arrancó con un suelo marcado por un déficit moderado de estrés hídrico (dato proveniente de la red de humedad de suelo del proyecto RIAN; Septiembre 2010), sumado a un menor aporte de las precipitaciones de ese año. En consecuencia el agua acumulada durante el periodo crítico no superó el cuartil 25 y por otro lado las temperaturas máximas que estuvieron por encima de los 30 °C durante los subperíodos PcR1 y PcR1-R6 (Rattalino et al., 2011) afectando en mayor magnitud el tratamiento en seco. A su vez las altas temperatura acortaron la duración de estos dos últimos subperíodos, reduciendo el número de días y esto, además, afectó la captura de radiación en la Fs Te del 2011.

El efecto del híbrido no fue consistente, ya que en el primer año (2009-2010) el híbrido de mayor rendimiento fue AX 886 y en el segundo año (2010-2011) fue AX 878.

Los altos valores obtenidos en los rendimientos tanto potenciales como en los rendimientos máximos en seco de las Fs Ta se dieron con un 19 % menos de oferta de radiación solar respecto a la Fs Te y temperaturas medias máximas de 30 °C durante el periodo crítico (alrededor de floración) y de 27 °C en llenado de granos (datos promedios de dos años), siendo esta última menor en un 14 % respecto a la temperatura máxima de la primera fecha de siembra. Estas condiciones de radiación y temperaturas máximas similares a las de una siembra temprana le confieren ciertas ventajas a la implantación del maíz en estas fechas tardías de siembra a diferencia de zonas como Buenos Aires donde además de la menor oferta de radiación solar, las temperaturas son más bajas (Cirilo, 1994a; Otegui, 1995).

Los rendimientos potenciales obtenidos en este trabajo en siembras tempranas fueron similares (16.000 kg ha⁻¹) a los obtenidos por Ruffo et al., 2015 en la región de Illinois, USA (16.890 kg ha⁻¹) con alta tecnología (densidad plantas, fungicidas, manejo

óptimo de fertilización), y a los obtenidos por Grassini et al., 2011 en la región Central del Nebraska (USA) con manejo de la densidad de plantas e híbridos de mayor ciclo. Ambos autores estimaron una brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento actual del 28 % en Illinois y del 21 % en Nebraska. En el Norte de China se estimaron rendimientos potenciales con modelos de simulación en un rango de 12.111 a ca. 13.500 kg ha⁻¹, con una brecha del 42 %. Estos valores de rendimientos son inferiores respecto a los hallados en este trabajo de tesis debido a factores tales como tipo suelo, régimen climático y factores de manejo (Liang et al., 2011). Respecto al rendimiento potencial obtenido en Fs Ta los resultados fueron semejantes a los simulados por Madonni (2009) en los mejores años para la zona de Pergamino (norte de Buenos Aires).

Según Lobell (2009) el maíz es uno de los cereales en el que los rendimientos a nivel mundial no superan el 70 % del rendimiento potencial. Aramburu Merlos y col. (2015), analizaron que las brechas de rendimiento (entre el RAs y el RR) en nuestro país en maíz y trigo son alrededor del 41 %, relacionando la variabilidad interanual de los rendimientos con años Niña (años secos) o Niño (años húmedos).

La Fs Te del 2009-2010 maximizó el NG en el tratamiento regado debido a una buena oferta del ambiente (luz, temperatura y agua,) y además a una mayor duración de días en la etapa desde floración hasta madurez fisiológica en comparación con la Fs Te del 2010-2011. Por lo tanto esta Fs Te interceptó una mayor cantidad de radiación solar que se tradujo posteriormente en biomasa. Solo en el 2009-2010 se observó una disminución en el NG y en el NGE con el atraso en la fecha de siembra (Andrade 1995; Tsimba et al., 2013). En el 2010-2011, la Fs I maximizó el NG y NGE en el tratamiento bajo riego superando a la Fs Te, sin embargo el periodo crítico fue acompañado de elevadas temperaturas con lo cual hubo una disminución del NG (Rattalino Edreira et al., 2011) y la brecha entre los tratamientos con y sin agua fueron las mayores respecto de las otras dos fechas de siembra ya que al tratamiento en seco se le sumó el estrés hídrico durante el periodo de definición del rendimiento.

Respecto al NGE diversos autores (Uhart y Andrade, 1995; Cirilo y Andrade 1994b; Fisher y Palmer 1984) asocian el NGE con la disponibilidad de asimilados alrededor de floración y esto está ligado a la condición del ambiente. De esto se deduce que los menores valores encontrados en el NGE (en los dos años de evaluación) en las fechas de siembras Te e I del 2010-2011 (tratamientos bajo condiciones de seco) se debieron posiblemente a que en estas fechas de siembra el periodo crítico del cultivo atravesó un estrés térmico con temperaturas máximas por encima de los 33 °C sumado al estrés hídrico que comenzó días previos a la floración afectando la tasa de crecimiento de la planta e incidiendo en el

número de granos por espiga y posteriormente en el peso de los granos (Gambín et al., 2006).

En cuanto al PMG, el mayor peso se dió en la Fs Te del 2009-2010 y en la Fs I del 2010-2011, coincidente con las fechas de siembra donde se obtuvieron los mayores rendimientos. Estos valores máximos en el PMG obtenidos en esta tesis en ambas fechas de siembra (Te 2009-2010: 365 g e I 2010-2011: 340 g) concuerdan con los datos encontrados por Razquin et al., 2016 y Santillan Hatala et al., 2016. Estos autores mediante experimentos a distintas densidades, genotipos y con siembras de diciembre en la zona centro de Córdoba relacionaron el PMG y el NG para diferentes niveles de rendimiento demostrando que con los genotipos modernos se pueden lograr hasta 6.000 granos por unidad de superficie y pesos en los granos de hasta 350 g, pero que no siempre se traducen en altos rendimientos. Entre años hubo diferencias significativas en los PMG pero no mostró grandes variaciones ante el atraso en la fecha de siembra de ambos años por lo que se comportó de manera más estable (Borrás et al., 2009) que el NG.

La biomasa generada por el cultivo tuvo una buena correlación con el rendimiento y el IC se mantuvo prácticamente invariable ante el atraso en la siembra a diferencia de lo establecido por Cirilo y col. (1994a) quienes observaron que el IC disminuye en las siembras tardías debido a una disminución en la incidencia de la radiación y a una menor eficiencia en el uso de radiación durante el periodo de llenado de granos. Esto podría deberse a que en latitudes mayores los niveles de radiación y temperatura disminuyen con el atraso en las siembras.

Las brechas relativas de las variables Rto y NGE se incrementaron en la Fs I, este efecto se podría explicar por las bajas precipitaciones y elevadas temperaturas durante el ciclo del cultivo en el 2010-2011. Mientras que en el NG esta brecha fue mayor en la Fs Ta. Es importante destacar que la magnitud de las brechas en las distintas componentes están por debajo del 25 %. Con lo cual las posibilidades de disminuir las brechas de rendimiento e incrementar el rendimiento en secano son menores.

3.5 Conclusiones

2a) La primera parte de la hipótesis que plantea los rendimientos potenciales se maximizan en fechas de siembras tempranas dado por una mayor oferta de radiación solar es rechazada ya que el máximo rendimiento se logró en la fecha de siembra temprana únicamente en el primer año en tanto que en el segundo año fue en la fecha de siembra intermedia.

2b) En cuanto a las brechas de rendimiento, se incrementaron con el atraso en la fecha de siembra solo en el primer año por lo tanto no se acepta esta parte de la hipótesis..

2c) Los resultados indican que el número de granos por espiga fue uno de los componentes del rendimiento que mejor explicó las brechas de rendimiento, por lo tanto se acepta esta parte de la hipótesis.

Las brechas de rendimiento del cultivo de maíz resultaron ser menores al 25 % en las tres fechas de siembra, siendo de mayor magnitud en la fecha de siembra intermedia.

3.6 Bibliografía

Albrech, R., Andriani, J., Castellarin, J., De Emilio, M., Ferraguti, F., Gentili, O., Gerster, G., Malmantile, A., Martins, L., Méndez, J., Pagani, R. Pedrol, H., Prieto, G., Rossi, J., Rosso, O. y Trentino, N. 2009. Evaluación de híbridos de maíz en el centro sur de Santa Fe, campaña 2008/09. Revista Para Mejorar la Producción N° 41. Págs: 7-34.

Albrech, R., Andriani, J., Castellarin, J., De Emilio, M., Ferraguti, F., Gentili, O., Gerster, G., Malmantile, A., Martins, L., Méndez, J., Pagani, R. Pedrol, H., Prieto, G., Rossi, J., Rosso, O. y Trentino, N. 2008. Evaluación del comportamiento de híbridos de maíz en diferentes ambientes del sur de Santa Fe, campaña 2007/08. Revista Para Mejorar la Producción N° 38. Págs: 8-40.

Andrade, F., Abbate, P., Otegui, M., Cirilo, A., Cerrudo, A. 2010. Ecophysiological Basis for Crop Management. The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology 4 (Special Issue 1) 23-34. 2010. Global Science Book.

Andrade, F., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M. y Valentinuz O. 1999. Kernel numberdetermination in maize. Field Crops Science, 39: 453-459.

Andrade, F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research, 41 (1995) 1-12

Andrade, F, Uhart G., Arguissain, G., and Ruiz, R. 1992. Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. Field Crops Research, 28345-354.

Aramburu Merlos, F., Monzón, J.; Mercau, J., Taboada, M., Andrade, F., Hall, A., Jobbagy, E., Cassman, K., Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. Field Crops Research, 184: 145-154.

Borrás, L., Zinselmeier, C., Senior, M., Westgate, M., Muszynski, M. 2009. Characterization of grain-filling patterns in diverse maize germplasm. Field Crops Science, 49: 999–1009.

Bruulsema, T., Tollenaar, M., y Heckman, J. 2000. Boosting crop yields in the next century. Better Crops 84, 9–13.

Calviño, P., Andrade, F. y Sadras, O. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy Journal*, 95: 275-281.

Castellarín, J., Ferraguti, F. y Andriani, J. 2010. Caracterización del ambiente y determinación del rendimiento de maíz durante la campaña 2009/10 en Oliveros (Santa Fe). *Revista Para Mejorar la Producción* N° 44. Pág. 35-40.

Cirilo, A. y Otegui, M. 2017. Capítulo 2: Progreso genético del maíz en Argentina: efecto de la fecha de siembra. El mismo maíz, un nuevo desafío: compendio primer congreso maíz tardío. Editores Borrás, L. y Uhart, S. San Isidro: Dow agrosiences Argentina 2017. ISBN 978-987-98384-3- 3.

Cirilo A., Andrade F. 1994a. Sowing date and maize productivity. I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crops Science*, 34:1039-1043.

Cirilo A., Andrade, F. 1994 b. Sowing date and maize productivity. II. Kernel number determination. *Crops Science Research*, 34:1044-1046.

Damen D., Leguizamón S., Fantino, V., Bendahan, M. 2003. Concurso de Rendimiento de Maíz INTA Venado Tuerto. Resultados finales de tres años. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 23], 149-152. Campaña 2002-2003.

Duvick, D. 2005. The contribution of breeding to yield advances in maize. pp. 83-145. In: D.N. Sparks (Ed.) *Advances in Agronomy*, Vol. 86. Academic Press, San Diego, CA.

Duvick, D., Cassman, K. 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crops Science Research*, 39: 1622– 1630.

Duvick, D. 1983. Chapter 2. Genetic Contributions to Yield Gains of U.S. Hybrid Maize, 1930 to 1980. p. 15–47. In W.R. Fehr (ed.) *Genetic contribution to yield gains of five major crop plants*. CSSA Special Publication 7. CSSA and ASA, Madison, WI.

Duvick, D. 1977. Genetic rates of gain in hybrid maize yields during the past 40 years. *Maydica*, 22: 187-196.

Echarte, L., Nagore, L., Di Matteo, J., Cambareri, M., Robles, M. and Della Maggiora, A. 2013. Grain Yield Determination and Resource Use Efficiency in Maize Hybrids Released in Different Decades. In: M. Stoytcheva (Ed.)

Echarte, L., Luque, S., Andrade, F., Sadras, V., Cirilo, A., Otegui, M., Vega, C. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean Hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research* 2000; 68 1-8.

Eyhérabide G., Damilano, A. 2001. Comparison of genetic gain for grain yield of maize between the 1980s and 1990s in Argentina. *Maydica*, 46: 277-281.

Ferraguti, F., Malmantile, A., Prieto, G., De Emilio, M., Gerster, G., Ibarlucea, J., Palau, E., Pagani, R., Vita, E. 2018. INTA Oliveros informa ya. Maiz tardío. Campañas 2013/14, 2014/15, 2016/17 y 2017/18. Informe digital web INTA: <https://inta.gob.ar/documentos/oliveros-informa-ya-maiz-tardio-campana-2017-18>.

Ferraguti, F., Malmantile, A., Prieto, G., Castellarin, J., Albrech, R., Almada, G., Andriani, J., Capurro, J., Cencig, G., Condorí, A., De Emilio, M., Dickie, M., Gentili, O., Gerster, G., Martins, L., Méndez, J., Pagani, R. G., Varisco, L., Vita, E. 2014. Rendimiento y estabilidad de híbridos de maíz de primera y de segunda del INTA Oliveros. Campaña 2013-2014. *Revista Para Mejorar la Produccion* N°52. Pág. 41-47.

Gambín, B., Borrás, L., Otegui, M. 2006. Source-sink relations and Kernel weight differences in maize temperate hybrids. *Field Crops Research*, 95: 316–326.

Grassini, P., van Bussel, L., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M., Cassman, K. 2015. How good is good enough? Data Requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177: 49–63.

Grassini, P., Yang, H., Irmak, S., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt. II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Research* 120, 133–141.

Jandel Scientific 1991. Table Curve V. 3.0. User's Manual Version 3.0 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera, CA.

Liang, W., Carberry, P., Wang, G., Lü, R., Lü, H., Xía, A. 2011. Quantifying the yield gap in wheat-maize cropping systems of the Hebei Plain, china. *Field Crops Research* 124, 180-185.

Littell, R., Milliken, R., Stroup, W., Wolfinger, R. 1996. SAS system for MIXED models. SAS Institute, Cary, NC.

Lobell, D., Cassman. and Feld, C. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Revision Environment Resources*, 34:179–204

Lv, S., Yang, X., Lin, X., Liu, Z., Zhao, J., Li, K., Mu, Ch., Chen, X., Chen, F., Mi, G. 2015. Yield gap simulations using ten maize cultivars commonly planted in Northeast China during the past five decades. *Field Crops Research*, 205: 1-10.

Madonni, G. 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo del agua en maíz. XVII Congreso Aapresid. Pág. 195-201.

Meng, Q., Hou, P., Wu, L., Chen, X., Cui, Z., Zhang, F. 2013. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China. *Field Crops Research*, 143: 91-97.

Ministerio de Agroindustria, 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones.

Muchow, R. 1990. Effect of the high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Research*, 23: 145-158.

Otegui, M., Nicolini, M., Ruiz, R., Dodds, P. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87: 29-33.

Pedrol, H., Castellarín, J., Rosso, O., y Dignani, D. 2005. Fechas de siembra y rendimientos en maíz. Oliveros, campaña 2004-2005. Revista Para Mejorar la Producción N° 32. Pág 8-14.

Prieto, G., Rossi, J., Malmantile, A., Gentili, O., Mendez, J. 2011. Estabilidad de híbridos de maíz de segunda en el centro-sur de Santa Fe. Campaña 2010/11. Revista Para Mejorar la Producción N° 46: 15-18.

Rattalino Edreira, J., Budakli Carpici, E., Sammarro, D., Otegui, M., 2011. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. Field Crops Research, 123: 62–73.

Razquin, C., Maddonni, G., Vega, C. 2016. Estabilidad de la eficiencia en el uso de la radiación solar durante el llenado de granos en maíz (*Zea mays*, L.) cultivado en fecha de siembra tardía. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Corrientes, p. 127.

RIAN 2014. Red de Información Agropecuaria Nacional. <http://rian.inta.gov.ar/>

Ritchie, J, and NeSmith, D. 1991. Temperature and crop development. In: Hanks, J., Ritchie J. (Ed.) Modeling plant and soil systems, Agronomy Series 31. American Society of Agriculture, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp 5-29.

Ritchie, S. and Hannway, J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University Special Report 48.

Ruffo, M., Gentry, L., Henninger, A., Seebauer, J. and Below, F. 2015. Evaluating Management Factor Contributions to Reduce Corn Yield Gaps. Agronomy Journal volume 107, Issue 2. Pp 405-505.

Salvagiotii, F. 2009. Rendimiento Potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. Revista Para Mejorar la Producción N° 41. INTA EEA Oliveros. 61-66.

Santillán Hatala, A., Ogando, F., Raspa, F., Incógnito, S., Maddonni, G., López, C., Vega, C. 2016. Variabilidad genotípica en el proceso de removilización de biomasa y su asociación con el rendimiento en el cultivo de maíz. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Corrientes, p. 131.

Sinclair, T. and Horie, T. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crops Science*, 29: 90-98.

Totis de Zeljkovich, L., Frutos, E., Améndola, C., Perez, G., Martinez, S. y Funston, L. 1995. Caracterización probabilística del régimen térmico para la zona de Pergamino (Buenos Aires), Argentina. *AGRISCIENTIA*, 1995, VOL. XII (Número especial): 61-69.

Troyer, A. 2000. Temperate corn: Background, behavior, and breeding. In *Specialty Corns* (A. R. Hallauer, Ed.), pp. 393-466. CRC Press, Washington, DC.

Tsimba, R., Edmeades, G., Millner, J., Kemp, P. 2013. The effect of planting date on maize grain yields and yield components. *Field Crops Research* 150 (2015) 135-144.

Uhart, S., Ferraris, G., Mazzini, C. 2017. Alta densidad poblacional y dosis de nitrógeno en siembras tardías de maíz en la zona núcleo maicera argentina? III Workshop Internacional de Ecofisiología de Cultivos. Mar del Plata, Septiembre 2017.

Uhart, S. and Andrade, F. 1995. Nitrogen deficiencies in maize: II. Carbon-nitrogen interaction on kernel number and grain yield. *Crops Science*, 35: 1384-1389.

Van Bussel, L., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yan, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K., Van Ittersum, M. 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177: 98–108

ANEXO II

Fotoperíodo Promedio (hs) por subperíodo del cultivo de maíz, por híbrido (Híb.) y fecha de siembra. Años 2009-2010 y 2010-2011.

Híb.	Fecha sbra	Subperíodo	Fotoperíodo (hs)	
			2009-2010	2010-2011
AX 878	Te	E-R1	14,3	14,4
		R1-R6	14,9	14,9
	I	E-R1	14,8	14,9
		R1-R6	14,8	14,5
	Ta	E-R1	13,3	14,7
		R1-R6	12,6	13,1
AX 886	Te	E-R1	14,3	14,4
		R1-R6	14,9	14,9
	I	E-R1	14,8	14,9
		R1-R6	14,8	14,6
	Ta	E-R1	13,3	14,7
		R1-R6	12,7	13,1
NK 900	Te	E-R1	14,4	14,4
		R1-R6	14,9	14,9
	I	E-R1	14,8	14,9
		R1-R6	14,8	14,5
	Ta	E-R1	13,3	14,7
		R1-R6	12,6	13,0

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE RENDIMIENTO POTENCIAL, RENDIMIENTO MAXIMO ALCANZABLE EN SECANO Y BRECHAS DE RENDIMIENTO EN TRIGO EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA Y DEL GENOTIPO

4.1 Introducción

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es un cereal de invierno que responde a días largos para inducirse a floración (Levy and Peterson 1973) y, su metabolismo corresponde a una planta C3 al igual que la soja. En condiciones potenciales, la temperatura y la radiación solar interceptada son los principales factores que afectan el número de granos fijados y por ende el rendimiento del cultivo de trigo (Fischer, 1985). A partir del siglo pasado uno de los aspectos centrales en los cuales trabajaron los programas de mejoramiento fue en mejorar la eficiencia en la fijación de carbono de una C3 con el objetivo de incrementar el rendimiento en trigo (Reynolds et al., 2009). De esta manera es que se lograron aumentos en el índice cosecha (IC) sin aumentar la biomasa total (Reynolds et al., 2009; Slafer y Andrade 1991). Otro de los aspectos fundamentales que resolvió la genética fue el problema de vuelco del cultivo con la introducción de los genes del enanismo (Rht) reduciendo la altura de planta (Slafer et al., 1990; Calderini et al., 1999). Asimismo se incrementó la fertilidad de las espigas y la partición de asimilados a los órganos reproductivos, y el peso potencial de los granos (Abbate et al., 1998; Reynolds et al, 2009; Fischer 1985, 2007; Berry et al., 2007). Posteriormente, se lograron mayores incrementos en la biomasa acumulada manteniendo estables los valores del IC (Shearman et al., 2005) mediante un aumento en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR; Long et al., 2006). En resumen, el mejoramiento genético contribuyó al incremento del rendimiento en el cultivo de trigo en más de un 50 % a nivel mundial (Slafer et al., 1994), en tanto que el resto se atribuyó a las tecnologías aplicadas de manejo y a la interacción del genotipo por ambiente (Evans y Fischer 1999).

Durante el siglo pasado los incrementos en el rendimiento evolucionaron a tasas no lineales ya que a partir de la introducción de materiales comerciales semi-enanos hacia la segunda mitad del siglo es que se produjeron los mayores aumentos de los que se venían registrando en varios países (ej Argentina: 40 kg ha⁻¹ año⁻¹, Calderini et al., 1995a; México: 70 kg ha⁻¹ año⁻¹, Sayre 1996; Australia: 6 kg ha⁻¹ año⁻¹, Siddique et al., 1989 y USA 16 Kg ha⁻¹ año⁻¹, Cox et al., 1988).

Sin embargo, en la actualidad el aumento de los rendimientos globales de trigo ocurre a una tasa anual que no supera el 1 %, un valor muy por debajo de lo que se

necesita para el abastecimiento a futuro de la población (Ray et al., 2013; Mackay et al., 2011; Hall and Richard, 2013). Esto posiblemente se deba a la escasez de nuevas técnicas de mejoramiento dentro de los programas. En Argentina con la introducción de los cultivares franceses entre los años 2000-2016 se registró un incremento en la tasa de rendimiento del cultivo a razón de $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, superando a Estados Unidos que logró $27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, estos incrementos en el rendimiento de los trigos en Argentina fueron en detrimento de la calidad del grano (Abbate et al., 2017).

En cuanto a rendimientos potenciales, Anderson et al., 2010 estimaron un rendimiento potencial (RP) para el trigo en el sur de Australia de alrededor de $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$, concluyendo en que la brecha entre el RP y el rendimiento actual (RA) aumentaba o disminuía en función de las lluvias durante el ciclo del cultivo según exceda o no el valor umbral de 250 mm. En el norte de China el RP se estimó en 9.100 kg ha^{-1} y la brecha con el RA fue del 32 % (Lu et al., 2013). En el Reino Unido, en condiciones del clima favorable para el crecimiento y desarrollo del cultivo, se presentó uno de los mayores valores en el promedio de RA a nivel mundial (8.000 kg ha^{-1}) y el RP se estimó en $10.400 \text{ kg ha}^{-1}$, con lo cual la brecha es estrecha entre el RP y el RA (<25 %). En tanto que el Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste (CIANO) en México, determinó una brecha de rendimiento entre el RP (9.000 kg ha^{-1}) y el RA (6.000 kg ha^{-1}) del 35 % (Fischer et al., 2010). En un estudio reciente en Brasil se demostró que desde los años 40 a la actualidad el rendimiento de trigo se triplicó con los nuevos cultivares existentes en el mercado, de esta manera el RP se estimó en 5.500 kg ha^{-1} y el RA en 2.200 kg ha^{-1} , lo que representa una brecha de 60 % del RP (Beche et al., 2014)

En Argentina en la región pampeana, Menéndez y Satorre (2007) estimaron rendimientos potenciales entre 5.000 y 7.300 kg ha^{-1} . Estudios posteriores establecieron las brechas de rendimientos a nivel nacional entre el RP y el rendimiento máximo alcanzable en seco (RAs) en un 30 % y entre el RAs y RA en un 41 % para el cultivo de trigo (Aramburu Merlos et al., 2015). El rendimiento promedio actual de trigo en la provincia de Santa Fe en los últimos 10 años es de 3.000 kg ha^{-1} (Ministerio Agroindustrias, 2017).

En consecuencia para lograr alcanzar los máximos rendimientos, es decir producir una mayor cantidad de granos por unidad de superficie (determinado en el periodo crítico; alrededor de la floración, Fischer 1985) en forma sostenible en el tiempo, es importante hacer un manejo estratégico del cultivo con el objetivo de que éste aproveche al máximo y eficientemente los recursos que ofrece el ambiente (Caviglia et al., 2004). Por otro lado el desarrollo de nuevas variedades de alto potencial sumado a los avances en la tecnología

aplicadas al manejo (fechas de siembra, densidad, fertilización, etc.) ha generado incrementos en los rendimientos y variaciones en las brechas que no han sido cuantificadas.

Hipótesis

3a) las fechas de siembras tempranas maximizan el rendimiento potencial en el cultivo de trigo ya que exponen al periodo alrededor de antesis a una menor temperatura media respecto de fechas de siembras más tardías, que aun en condiciones de radiación solar incidente menor, incrementan el número de granos y peso de los mismos

3b) las brechas de rendimiento entre el rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable en cultivares de trigo de un mismo ciclo son menores en las fechas de siembras tempranas respecto de siembras tardías.

3c) el número de granos por unidad de superficie del trigo es el componente del rendimiento que mejor explica estas brechas.

Objetivos Específicos

Estimar las variaciones de los rendimientos potenciales (RP), los máximos rendimientos alcanzados en condiciones de secano (RAs) y la brecha de rendimiento entre ellos en el cultivo de trigo en función de la fecha de implantación para diferentes genotipos en experimentos a campo.

Analizar los cambios en los principales componentes numéricos que expliquen las brechas de rendimiento.

4.2 Materiales y Métodos

4.2.1. Descripción del sitio Experimental, diseño y manejo

Se realizaron dos experimentos en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros, Santa Fe (32°33'S-60°51'W) durante las campañas 2010 y 2011. El suelo fue un Argiudol Típico serie Maciel, con más de 40 años bajo siembra directa. Se evaluaron tres cultivares de trigo pan de alto potencial de rendimiento (Albrecht et al., 2009; 2010), uno de ciclo largo (BioInta 3004), y dos cultivares de ciclo intermedio (Baguette 17 y Baguette 9).

Los mismos fueron sembrados en tres fechas: temprana (Fs Te), intermedia (Fs I) y tardía (Fs Ta) (Tabla 4.1). En la zona se considera como fecha de siembra óptima o de primera a partir del 20 de mayo hasta el 15 de junio para los cultivares de ciclos largos, como fecha de siembra intermedia desde mediados de junio a principios de julio (cultivares de ciclo intermedio) y como tardía desde principios de julio hasta la primera semana de agosto (ciclos cortos). La fecha de siembra de agosto no es una práctica muy habitual, solo se da en casos excepcionales (sequía o exceso de humedad).

A su vez, cada combinación de cultivar por fecha de siembra fue evaluada en dos condiciones de disponibilidad de agua: con riego (R) y en seco (S). El cultivo antecesor en las tres fechas de siembra y en los dos años de estudio fue soja de primera.

Las parcelas se sembraron en siembra directa a 0,15 m de distancia entre líneas, con una densidad de siembra de 300 plantas por metro cuadrado en las Fs Te e I mientras que en la Fs Ta se sembró con una densidad de 350 plantas por metro cuadrado. El tamaño de cada unidad experimental fue de 52 m² (2,6 m ancho por 20 m largo). A la siembra se fertilizó con 18 kg ha⁻¹ de fósforo (80 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico). La fertilización con nitrógeno (N) fue diferente para cada tratamiento: en el tratamiento con riego se fertilizó para alcanzar una disponibilidad de 150 kg N ha⁻¹ N en el suelo a la siembra a 60 cm + N fertilizante) mas 110 kg Sulfato de Calcio ha⁻¹ (yeso), mientras que para el tratamiento en seco fue de 92 kg N ha⁻¹ sumando el del suelo al fertilizante (práctica más habitual de productor). El momento de aplicación de la urea fue en inicio de macollaje.

La humedad inicial en el perfil de suelo para la Fs Te fue de 149 mm y para las Fs I y Ta del 2010 fue de 198 mm de agua para cada fecha de siembra hasta los dos metros de profundidad (las mediciones de agua inicial se realizaron por gravimetría) representando el 49 % y el 66 % de agua útil disponible para el cultivo. Para el 2011, el contenido inicial de agua fue de 193 mm en la Fs Te, 205 mm en la Fs I y 200 mm en la Fs Ta, estos datos representaron el 64, 68 y 66 % de agua útil en el suelo disponible para el cultivo al momento de la siembra (Te, I y Ta).

El tratamiento bajo riego se condujo con un sistema de riego por goteo manteniendo la humedad del suelo por encima del 60 % de agua útil teniendo en cuenta la información de la sonda de neutrones y la frecuencia de las precipitaciones. El diseño experimental utilizado fue en bloques al azar con tres repeticiones. El cultivo se mantuvo libre de malezas, plagas y enfermedades.

Tabla 4.1 Fechas de siembra del cultivo de trigo en la EEA INTA Oliveros. Años 2010 y 2011.

Fecha de Siembra	Año 2010	Año 2011
Te	17/05/2010	08/06/2011
I	23/06/2010	07/07/2011
Ta	23/07/2010	03/08/2011

4.2.2. Muestreos y Determinaciones en planta

Se registró el estado fenológico del cultivo semanalmente sobre una muestra de plantas tomadas al azar determinándose la emergencia (E). Posteriormente, se determinó el estado de doble lomo (DL) y espiguilla terminal (ET), mediante disecciones en el vástago según escala de Nerson (1980). El estado de antesis se determinó cuando el 50 % de las espigas presentaron las anteras expuestas (A) y por último madurez fisiológica (MF). Para la determinación del estado de madurez fisiológica con mayor precisión se realizaron muestreos de grano dos veces por semana extrayendo cinco espigas al azar de cada parcela y sacando diez granos del centro de la espiga, desde grano pastoso. Estos granos fueron llevados a estufa a 60 °C hasta peso constante. Luego con estos datos se realizó la curva de llenado de granos ajustando un modelo lineal –plateau utilizando el software Table Curve (Jandel, Scientific, 1991). Se determinó el día en que alcanzaba madurez fisiológica cuando el peso seco del grano se mantuvo constante.

En madurez fisiológica se determinó la biomasa aérea total en una muestra de 1 m² de superficie. Se separaron las estructuras vegetativas (hojas y tallos) de las reproductivas (espiga y granos). Las mismas fueron secadas en estufa a 60 °C hasta peso constante. Se calculó el índice de cosecha (IC), (a partir del cociente entre el peso seco de las semillas y el total de biomasa aérea en madurez fisiológica). En esta muestra se determinó además el número de espigas por metro cuadrado (NE). En madurez de cosecha se determinó el rendimiento de los granos con cosechadora experimental en una superficie de 5 m², el cual fue ajustado al 13,5 % de humedad. Se determinó el peso individual del grano a partir de una muestra de 200 semillas. Con esta información se calculó el número de granos por metro cuadrado (NG).

El cálculo de las brechas de rendimiento y de sus componentes numéricos se obtuvo por la diferencia entre el rendimiento potencial (RP: tratamiento regado) y el rendimiento máximo en seco (RAs: tratamiento en seco):

4.2.3. Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad diaria de agua en el suelo se calculó mediante el software Balance Hídrico de Cultivos Extensivos (BAHICU versión 1,02, Andriani, 2013) en el cultivar Baguette 17 en las tres fechas de siembra de los dos años de estudio. Este programa realiza un balance de agua en el suelo y permite observar la evolución del contenido de agua útil disponible para el cultivo en el perfil explorado por las raíces. Los datos de entrada para utilizar el modelo fueron: la humedad del perfil previo a la siembra, la evapotranspiración potencial (ETP) diaria según Penman Monteith, las precipitaciones diarias y las láminas de riego aplicadas en cada uno de los experimentos evaluados. A partir de estos datos de entrada se realizaron los gráficos del balance de agua para cada época de siembra. En estos gráficos se presentan las curvas de máxima capacidad de agua disponible (CC) en el suelo explorado por las raíces del cultivo, la curva del 50 % de agua útil considerada como el límite de estrés hídrico (L. Str) para ese volumen de suelo y el agua útil existente (AUE) que indica la disponibilidad diaria de agua en el suelo para el cultivo.

4.2.3. Registros de Variables Agrometeorológicas

Los datos meteorológicos provienen de la Estación Agro-meteorológica perteneciente a la Estación Experimental Agropecuaria INTA Oliveros.

Para el cálculo de los datos se dividió el ciclo del cultivo en tres subperíodos: i) E-prA, ii) A y iii) dA-MF. El primer subperiodo representa la etapa vegetativa del cultivo desde emergencia hasta 20 días previos a antesis, el segundo corresponde a la etapa alrededor de antesis: 20 días previos y 10 días después y el tercer subperiodo es la etapa de llenado de granos (10 días después de antesis hasta madurez fisiológica). En los tres subperíodos se realizó el cálculo del fotoperíodo promedio, las temperaturas máximas y mínimas, el promedio histórico de las temperaturas máximas y mínimas y el tiempo térmico (es la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura de base 0 °C (Kirby et al, 1984) desde E a ET y 4,5° C luego ET (Abbate et al, 1995). Además se calculó en cada año, por fecha de siembra y por cultivar el promedio y los cuartiles 25 y 75 de las precipitaciones acumuladas y de la radiación solar incidente acumulada de la serie histórica de 40 años de la Estación Agrometeorológica (1971-2011).

4.2.4. Análisis Estadístico

Las variables meteorológicas (temperatura y fotoperíodo) y la fenología se analizaron en forma descriptiva

Los datos correspondientes a rendimiento y sus componentes fueron analizados mediante un análisis de la varianza (ANAVA) utilizando el procedimiento Proc Mixed (Littel, 1996) del sistema estadístico SAS considerando como efectos fijos: año, fecha de siembra, genotipo y disponibilidad hídrica mientras que a la repetición/bloque se consideró como efecto aleatorio. Se analizaron las interacciones, en el caso de las interacciones de orden n si no eran significativas se procedió a analizar al nivel n-1 y así sucesivamente. Cuando las diferencias de medias eran significativas en el ANAVA, las diferencias de medias se les aplicaban el test de diferencias mínimas significativas (DMS) con un nivel de significancia de un 5%.

4.3 Resultados

4.3.1 Fenología

El fotoperiodo promedio en ambos años por fecha de siembra fue 12,9 hs en la Fs Te, 13,5 hs en la Fs I y 13,8 hs de luz en la Fs Ta. (ANEXO III).

El cultivo de trigo en las Fs Te e I del 2010 tuvo una duración promedio de su ciclo completo desde emergencia a madurez fisiológica de 166 y 141 días, con lo cual este año el ciclo del cultivo fue mayor respecto del 2011 en 14 y 16 días. En tanto que la Fs Ta tuvo en promedio un ciclo completo de 105 días en el 2011 siendo unos 3 días mayor respecto al año 2010. El ciclo total de desarrollo del cultivo de la Fs I se acortó en 26 días (2010) y 28 días (2011) respecto de la Fs Te.

La reducción de días entre la Fs I y Ta promediando los tres cultivares fue de 39 días en el 2010 y de 19 días en el 2011. La Fs Te exhibió una mayor duración en días en el subperiodo que va desde E-pr A respecto a las Fs I y Ta (Tabla 4.2).

La etapa correspondiente al llenado de grano en la Fs Te duró entre 27 y 29 días (2010) y entre 28 y 32 días (2011) según el cultivar (Tabla 4.2). En cuanto a las Fs I y Ta la duración de la etapa de llenado de grano fue menor en un 20 y 44 % (2010) y en un 38 y 60 % en el 2011 respecto a la Fs Te.

Respecto a los grados días acumulados (GDD) en cada subperiodo y fecha de siembra (Tabla 4.2), se observaron variaciones acordes a la fenología entre años, fechas de siembra y cultivares. En la Fs Te del 2010 el cultivar de ciclo más largo (BioInta 3004) acumuló 1.287 GDD desde emergencia hasta previo anthesis mientras que Baguette 17 y Baguette 9 acumularon 1.077 GDD (Tabla 4.2). Los grados días en el periodo de anthesis de la Fs Te del 2010 fue un 4 % inferior al mismo periodo del 2011, sin embargo en las Fs I y Ta del 2010 fue mayor en un 3 y un 20 % respecto al 2010. Siendo mas marcado en la Fs Ta del 2011 (369 vs 456 GDD del 2010).

Tabla 4.2. Duración de las etapas (días) y grados días acumulados (GDD) en el cultivo de trigo desde emergencia a 20 días previo a antesis (E-prA), periodo alrededor de antesis (A) y después de antesis a madurez fisiológica (dA-MF) según fecha de siembra y cultivar. Años 2010 y 2010.

Cu	Fecha Sbra	Subperiodos	Días		Grados Días (GDD)	
			2010	2011	2010	2011
BIOINTA 3004	Te	E-prA	115	99	1287	1115
		A	30	30	368	385
		A-MF	29	28	440	476
		E-MF	174	157	2095	1998
	I	E-prA	92	79	1058	1003
		A	30	30	441	419
		A-MF	26	17	434	295
		E-MF	148	126	1932	1717
	Ta	E-prA	59	66	989	905
		A	30	30	463	478
		A-MF	20	12	373	234
		E-MF	109	108	1824	1617
BAGUETTE 17	Te	E-prA	105	92	1077	991
		A	30	30	356	383
		A-MF	27	28	388	436
		E-MF	162	150	1821	1810
	I	E-prA	88	76	1028	918
		A	30	30	386	398
		A-MF	19	18	297	322
		E-MF	137	124	1711	1638
	Ta	E-prA	56	72	906	975
		A	30	30	454	315
		A-MF	12	12	236	216
		E-MF	98	114	1595	1507
BAGUETTE 9	Te	E-prA	104	89	1077	959
		A	30	30	360	364
		A-MF	29	32	414	498
		E-MF	163	151	1850	1821
	I	E-prA	85	73	1002	893
		A	30	30	397	375
		A-MF	23	19	359	331
		E-MF	138	122	1758	1599
	Ta	E-pr A	54	72	878	971
		A	30	30	451	315
		A-MF	15	12	271	216
		E-MF	99	114	1601	1502

La acumulación de grados días en el periodo llenado de granos en la Fs Te del año 2011 BioInta 3004, Baguette 17 y Baguette 9 presentaron mayores valores durante esta etapa que en el 2010 (476, 436 y 498 vs. 440, 388 y 414 GDD). Respecto a las Fs I y Ta se observó el mismo patrón del periodo anterior (antesis), es decir acumuló una mayor cantidad

de grados días el primer año respecto del segundo (363 y 293 en el 2010 vs. 316 y 222 GDD en el 2011).

4.3.2 Disponibilidad de Recursos

4.3.2.1. Disponibilidad de agua. Precipitaciones

Las precipitaciones acumuladas en el período de mayo a noviembre del 2011 fueron de 348 mm y en el 2010 fueron de 270 mm. Entre los meses de Octubre y Noviembre del 2011 llovieron 253 mm. Esto representó un 46% más que en el 2010 para los mismos meses, momento que coincidió con el llenado de granos en la Fs Te.

En el primer subperíodo del ciclo del trigo (E-prA), la Fs Te del 2010 fue quien acumuló una mayor cantidad de precipitaciones, con 122 mm en promedio de los tres cultivares (Figura 4.1a) superando al promedio histórico en un 21 %. En tanto que en el 2011 este valor fue en promedio de 49 mm (Figura 4.1b), representando un 43 % inferior al promedio de la serie histórica en dicho subperíodo. Analizando el mismo subperíodo, en la Fs Ta del 2010 los cultivares acumularon en promedio 70 mm (Figura 4.1a), superando al cuartil 25 en un 17 % pero no al promedio histórico (109,7 mm). En 2011, para esta misma fecha de siembra fueron un 8 % superior al promedio histórico. Para la Fs I del 2010, la cantidad de lluvia fue similar entre los cultivares (alrededor 70 mm), mientras que osciló entre 24 y 100 mm en 2011 siempre por debajo del promedio histórico en los dos años (Figura 4.1b).

En el subperíodo alrededor de antesis (A) las precipitaciones en las tres fechas de siembra del 2010 Te, I y Ta fueron menores en un 31, 58 y 60 % al promedio histórico de la serie y al cuartil 75 entre un 53 a 70 %, respectivamente. En cambio en la Fs Te del 2011 la acumulación de lluvias varió de 116 a 159 mm (Figura 4.1b) según el cultivar superando en un promedio de 41 y 22 % al registro de la serie histórica y al cuartil 75 para el mismo subperíodo. Por otro lado, las precipitaciones durante el periodo crítico alrededor de antesis en la Fs I fue superior en un 22 % al promedio histórico de la serie, no así la Fs Ta del mismo año donde no superó al cuartil 25

Durante el subperíodo llenado de granos (dA-MF), en la Fs Te del 2010 las lluvias registradas fueron de 33 mm, en la Fs I y Ta fueron de 42 y 12 mm, estos valores estuvieron por debajo del promedio histórico en un 67, 52 y 79 %. En el 2011 para el mismo subperíodo las precipitaciones fueron 70, 56 y 51 mm en las Fs Te, I y Ta, respectivamente, sin superar la serie histórica de más de 40 años (38 y 16 % inferior) con excepción del Fs Ta (fue un 19 % más respecto al histórico)

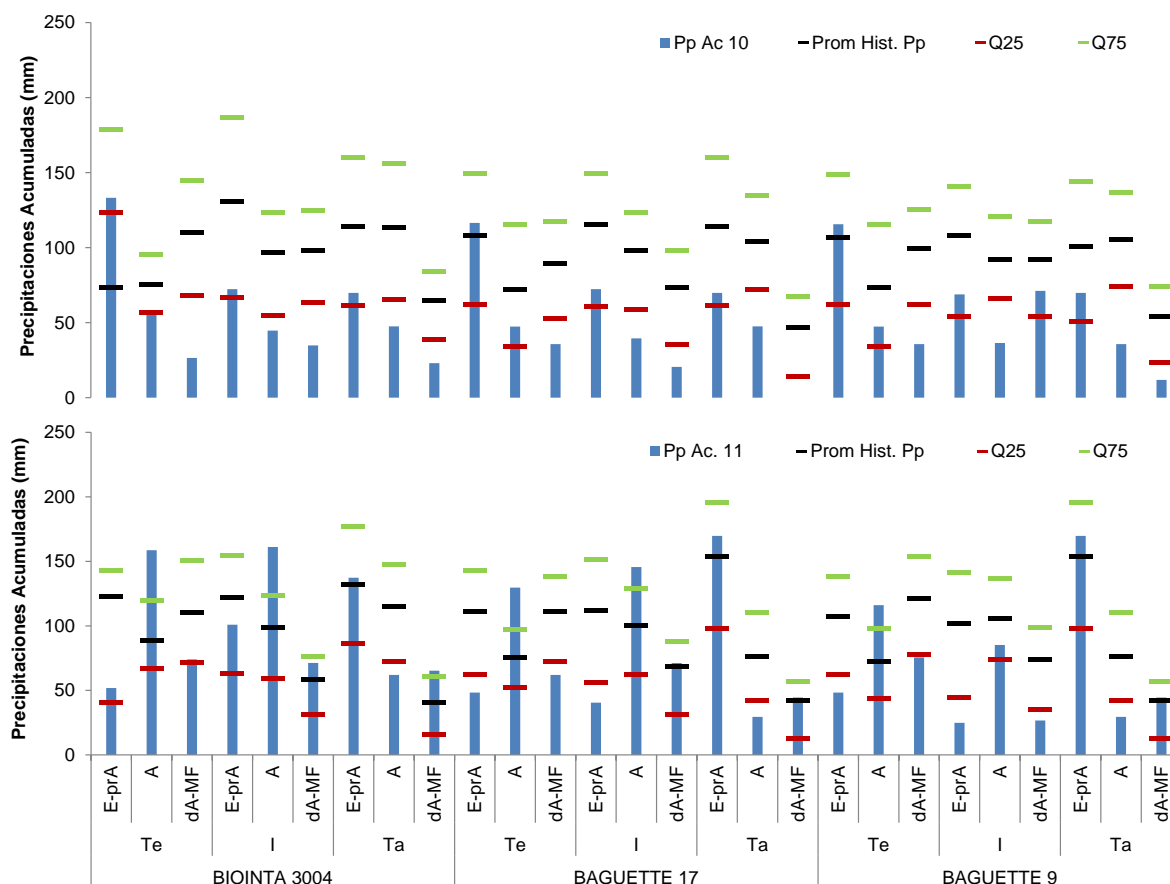


Figura 4.1. Precipitaciones acumuladas (mm) durante los subperiodos E-prA, A y dA-MF para tres cultivares de trigo en tres fechas de siembra en los años 2010 (a) y 2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

4.3.2.2. Oferta de Radiación

La oferta de radiación acumulada fue mayor en el 2011 (2.639 Mj m^{-2}) que en el 2010 (1.192 Mj m^{-2}), superando al promedio histórico en un 4%.

En el subperiodo E-prA los mayores valores acumulados de radiación fueron en la Fs Te del 2011 con 1104 Mj m^{-2} , superando el promedio histórico en un 6 % y en un 2 % al cuartil 75. En tanto que en el 2010 este valor fue de 942 Mj m^{-2} , similar al registro histórico de 40 años. Respecto a la Fs I y Ta, en el 2010 acumularon 1016 y 756 Mj m^{-2} sin superar el promedio histórico (1078 y 830 Mj m^{-2}), mientras que en el 2011 estos valores fueron mayores (1038 y 1089 Mj m^{-2}), por encima del registro histórico en un 5 %. Entre los cultivares, BioInta 3004 acumuló una mayor radiación en el primer subperiodo y en las tres fechas de siembra del 2011 (1195 , 1090 y 1023 Mj m^{-2} , Figura 4.2b). En la Fs I lo hizo Baguette 17 con 1038 Mj m^{-2} .

En el periodo crítico (A) del 2010, la radiación acumulada fue mayor en la Fs Ta, representando entre un 21 y un 15 % más respecto a las Fs Te e I. superando al promedio

histórico en un 8% y al cuartil 75 en un 2 %. En el 2011, la radiación solar acumulada fue mayor en la Fs I, superando en un 14 y un 5 % a las Fs Te y Ta.

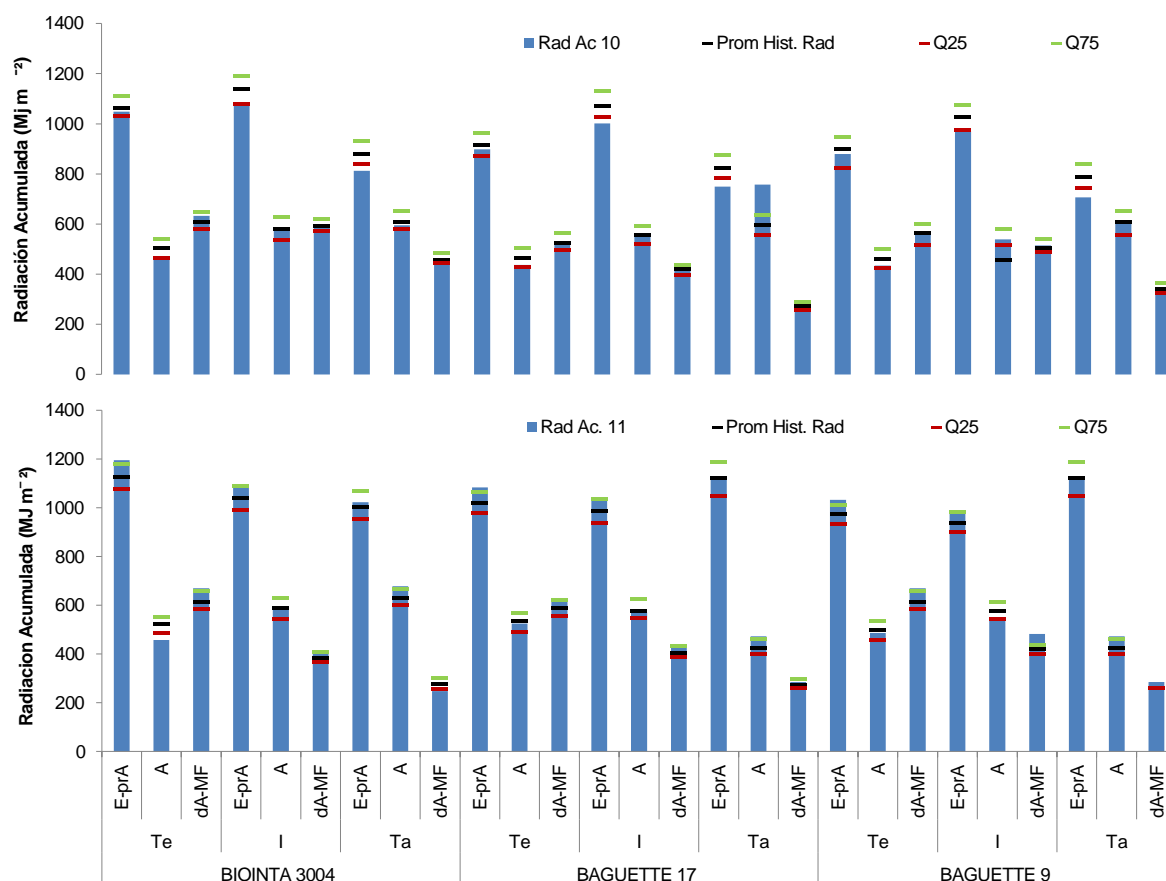


Figura 4.2. Radiación solar acumulada (Mj m^{-2}) durante los subperíodos E-prA, A y dA-MF para tres cultivares de trigo en tres fechas de siembra en los años 2010 (a) y 2011 (b). Se indica el valor promedio de cada año (barras), los valores promedios históricos (línea negra), y los cuartiles 25 (línea roja) y 75% (línea verde) de la serie climática histórica de 40 años de la EEA Oliveros INTA.

En el periodo de llenado de granos (dA-MF), la radiación solar acumulada fue disminuyendo al atrasar la fecha de siembra en ambos años de estudio. Los resultados demuestran que la Fs Te de ambos años superó en un 37 y un 58 % a la Fs Ta del 2010 y 2011 respectivamente.

4.3.2.3. Temperatura

El 2010 tuvo mayor amplitud térmica en promedio durante los meses de junio a noviembre (Máx.: $21,7^{\circ}\text{C}$ y Mín $8,7^{\circ}\text{C}$) que en el 2011 (Máx. $21,3$ y Mín $9,5^{\circ}\text{C}$).

Durante el subperíodo de emergencia a 20 días antes de floración hubo diferencias de temperaturas máximas entre las Fs Te e I de ambos años de alrededor de entre uno y

dos grados (18 y 18,9 °C del 2010 vs. 17,9 y 19,4°C del 2011). En la Fs Ta la temperatura máxima se incrementó respecto de la Fs I acorde a la época del año, siendo mayor este aumento en el 2010 (21,7°C) mientras que en el 2011 fue de 20,6°C. Indistintamente del año, entre los cultivares las temperaturas máximas de la Fs I no superaron al promedio histórico (estos valores fueron entre un 13 y un 10% inferior a dicho promedio histórico, Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Temperatura Máximas (T Máx.), Mínima (T Mín.) y Promedio Histórico de Temperatura Máxima y Mínima (T Hist. Máx.- T Hist. Mín.), en los subperiodos E-prA, A, y dA-MF en tres cultivares de trigo y tres fechas de siembra. Años 2010 y 2011.

Cu	Fecha Sbra	Subperiodo	T°C Máx 10	T°C Máx 11	T°C Hist. Máx.	T°C Mín. 10	T°C Mín. 11	T°C Hist. Mín.
BIOINTA 3004	Te	E-prA	18,3	18,2	18,1	5,9	5,9	7,6
		A	23	22,1	23,1	10,8	12,6	11,1
		dA-MF	27,5	27,7	26,0	11,8	15,6	13,7
	I	E-prA	19	19,5	19,2	5,8	7,4	7,3
		A	25,8	23,7	24,6	13,1	13,3	13,0
		dA-MF	28,6	28,8	27,1	13,2	15,7	14,5
	Ta	E-prA	21,9	20,5	20,9	9,1	8,7	8,8
		A	26,4	25,8	25,4	11,6	14,1	13,2
		dA-MF	29,1	30,4	27,9	14,1	17,6	15,1
BAGUETTE 17	Te	E-prA	17,9	17,8	17,8	5,4	5,6	6,4
		A	22,6	22,5	22,2	10,4	12,1	10,1
		dA-MF	25,9	25,8	25,2	11,8	14,3	13,0
	I	E-prA	18,8	19,3	19,1	5,8	7,2	7,2
		A	24,5	22,9	24,1	12,4	12,7	12,7
		dA-MF	28,3	28,4	26,4	16,0	16,4	13,9
	Ta	E-prA	21,7	20,6	21,1	8,9	9,0	8,8
		A	26,5	26,3	25,2	12,0	14,3	13,1
		dA-MF	27,3	28,8	27,2	12,4	16,1	14,7
BAGUETTE 9	Te	E-prA	17,8	17,7	17,7	5,4	5,7	6,3
		A	22,8	22,0	22,0	10,5	11,3	9,9
		dA-MF	26	25,9	25,2	11,6	14,2	12,9
	I	E-prA	18,8	19,3	19,0	5,7	7,1	7,1
		A	24,3	22,0	23,8	10,7	12,1	11,9
		dA-MF	27,9	28,0	26,2	12,1	15,9	13,6
	Ta	E-prA	21,6	20,6	21,0	8,9	9,0	8,8
		A	26,2	26,3	25,1	11,5	14,3	12,9
		dA-MF	27,7	28,8	27,2	13,1	16,1	14,8

Durante el período alrededor de antesis, el registro de las temperaturas máximas rondó entre los 22,8 y 24,8°C para las Fs Te e I del 2010 y de 22,8 a 22,9°C para las mismas Fs del 2011 (Tabla 4.3). En cuanto a la Fs Ta del 2010 la Máx. fue de 26,4°C y en el 2011 de 26,1 °C superando a la media histórica (25,2 °C).

El subperiodo correspondiente a llenado de granos tuvo temperaturas máximas medias que alcanzaron los 28 y 29,3 °C en la Fs Ta del 2010 y 2011 superando el promedio histórico en un 3 y un 7 % (27,4°C). Entre cultivares fue BioInta 3004 quien alcanzó los 30,4°C en este subperiodo en la Fs Ta del 2011 (Tabla 4.3).

Respecto a las temperaturas mínimas del primer subperíodo (E-pr A), el valor mínimo se registró en la Fs Te del 2010 en el cultivar Baguette 17 con 5,4 °C (Tabla 4.3) siendo un 15 % menor a la serie histórica. En el resto de las Fs la temperatura mínima dentro del primer subperiodo varió desde los 5 a los 9° C en el 2010 y desde los 5,9 a los 9 °C en 2011.

4.3.2.4. Disponibilidad de agua en el suelo

A principios del mes de junio del 2010 la disponibilidad inicial de agua en el perfil del suelo fue de 250 mm lo que representó aproximadamente un 83 % del agua máxima disponible en el suelo hasta los dos metros de profundidad. Para el mismo mes del 2011 fue de 193 mm, por lo que a la siembra se disponía de un 64 % de agua útil en el suelo.

La disponibilidad de agua en el suelo en la Fs Te de 2010 se mantuvo cercana a capacidad de campo hasta llegar a fines de agosto (Figura 4.3b). A partir de ahí con la aplicación de los riegos, la curva de agua disponible para el cultivo estuvo siempre por encima del límite de estrés hídrico (Figura 4.3a) hasta entrada la madurez del cultivo, mientras que el de secano estuvo por debajo de la curva límite de estrés.

En la Fs I del mismo año el agua disponible en el suelo estuvo casi todo el ciclo del cultivo cercano al límite de estrés, pasando a estar por debajo de ese límite en el mes de agosto y a mediados de octubre en el tratamiento en secano (Figura 4.4b) coincidiendo con el periodo crítico. En la Fs Ta del 2010 los riegos se aplicaron desde el estado vegetativo lo cual permitió mantener el cultivo con humedad cercana a capacidad de campo a diferencia del tratamiento limitado por agua que sufrió déficit desde el inicio del ciclo (Figuras 4.5 a y b).

En la Fs Te del 2011 debido al aporte de las lluvias durante el periodo vegetativo hasta espiguilla terminal hubo buena disponibilidad de agua en el suelo. A partir de ahí el tratamiento en secano estuvo por debajo del límite de estrés (Figura 4.6b).

En la Fs I del 2011 hacia mediados de agosto y principios de septiembre la disponibilidad de agua en el suelo estuvo por debajo del límite de estrés ya que no hubo precipitaciones, este periodo coincidió con el cambio de estado vegetativo a reproductivo del cultivo (i.e. doble lomo, Figura 4.7b).

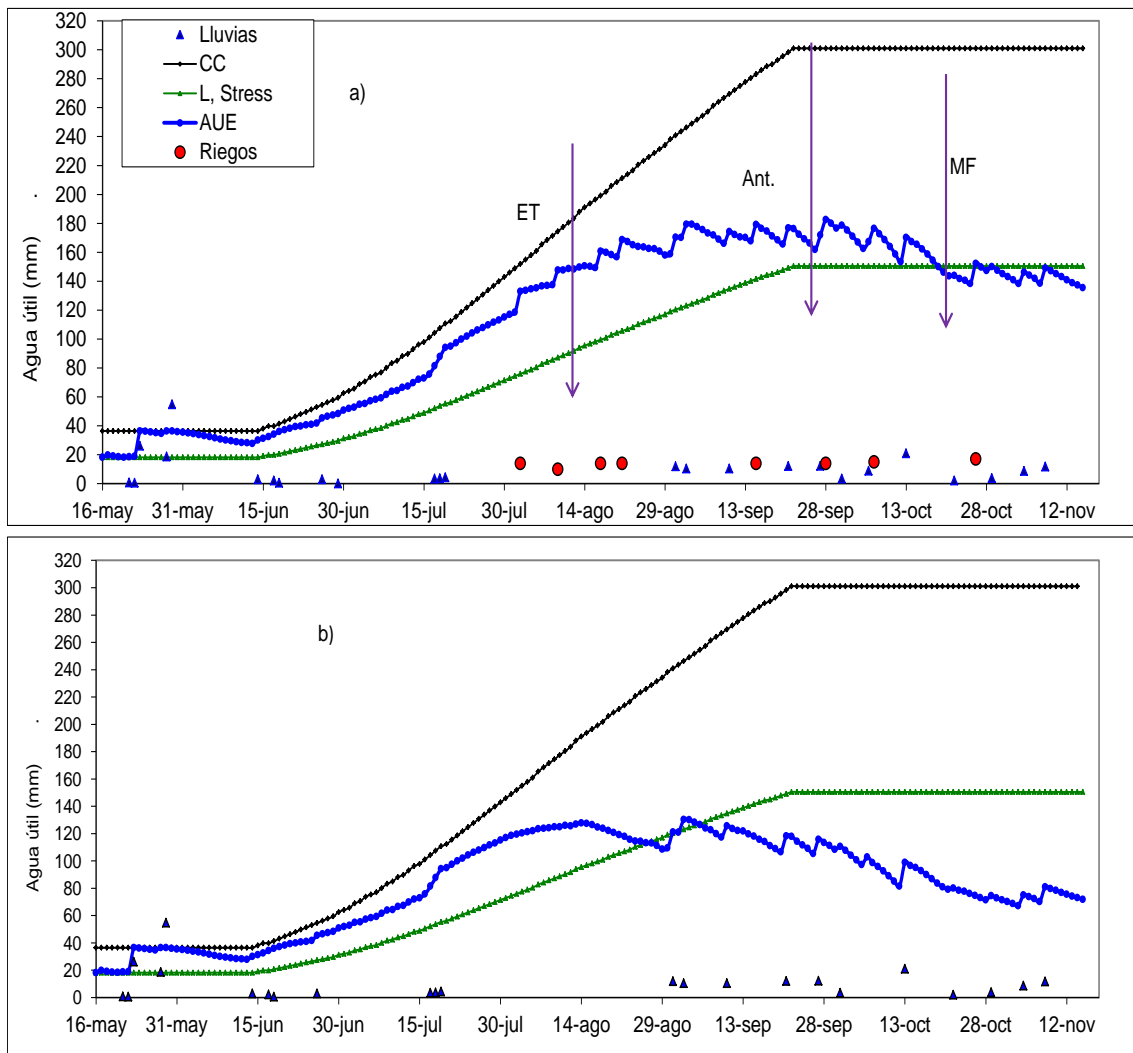


Figura 4.3 Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar Biolnta 3004, fecha siembra temprana (Te) con riego (a) y en secano (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) ET (Espiiguilla Terminal), Ant. (Antesis), MF (Madurez Fisiológica). Año 2010.

La Fs Ta del 2011 al igual que las otras dos Fs anteriores tuvieron en común que la etapa vegetativa estuvo casi sin disponibilidad de agua (Figura 4.8a y b), por lo que a mediados de septiembre se incorporaron los riegos en el tratamiento bajo riego con el fin de mantener la humedad en las parcelas (entre macollaje y doble lomo, Figura 4.8a), luego de este periodo no fue necesario realizar más riegos.

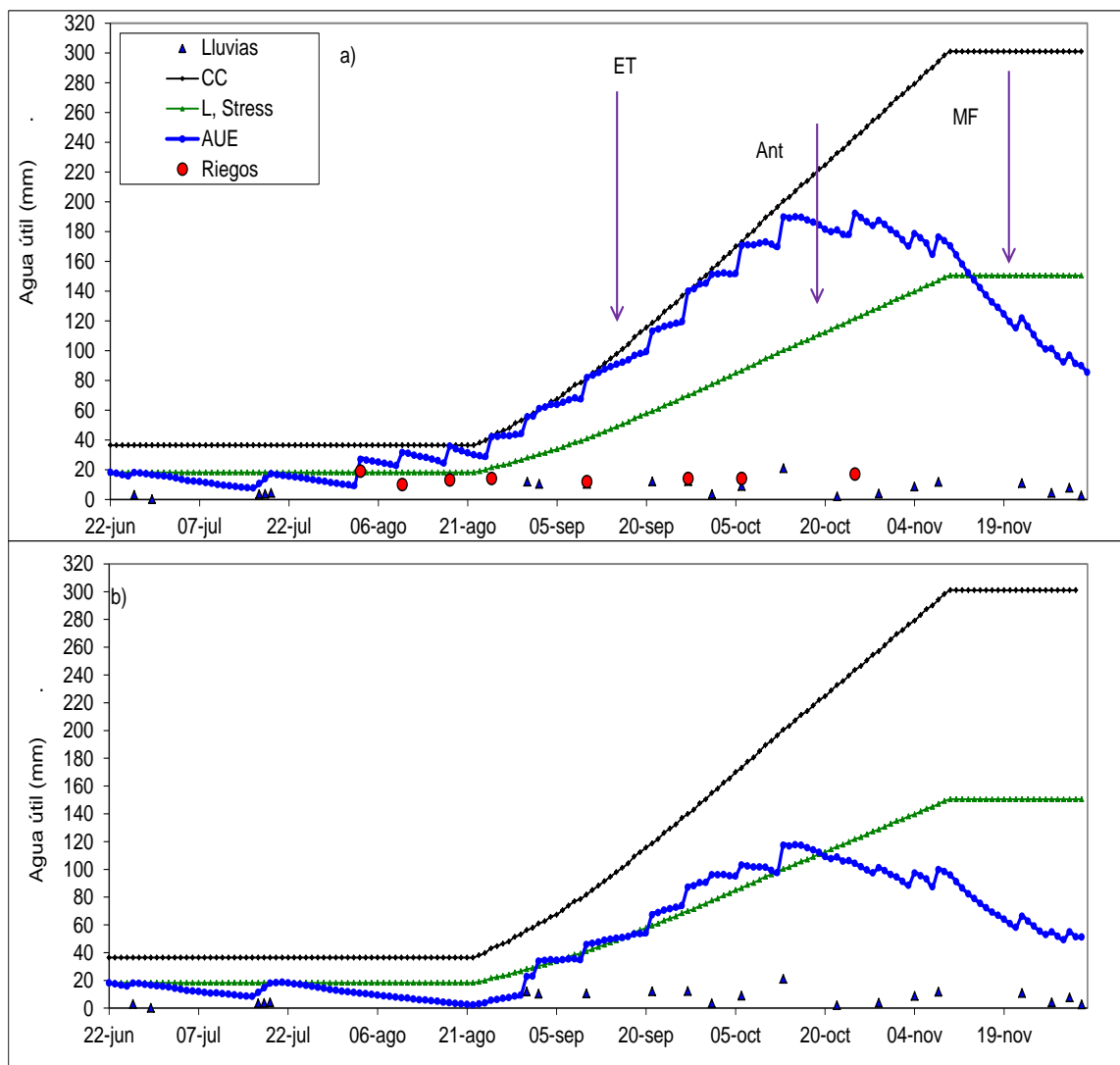


Figura 4.4. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra Intermedia (I) con riego (a) y en seco (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), MF (Madurez Fisiológica). Año 2010.

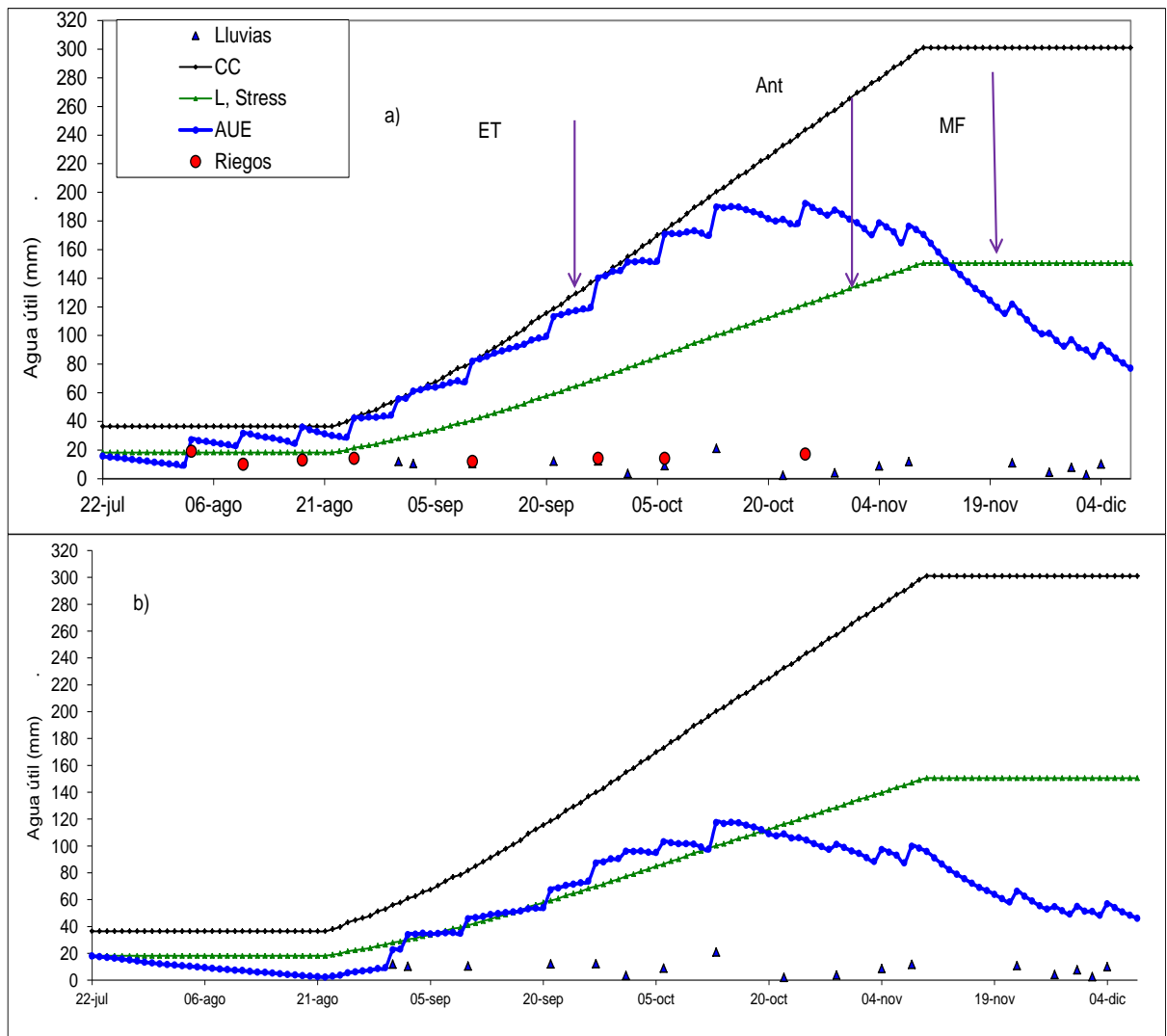


Figura 4.5. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha siembra tardía (Ta) con riego (a) y en seco (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Anthesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2010.

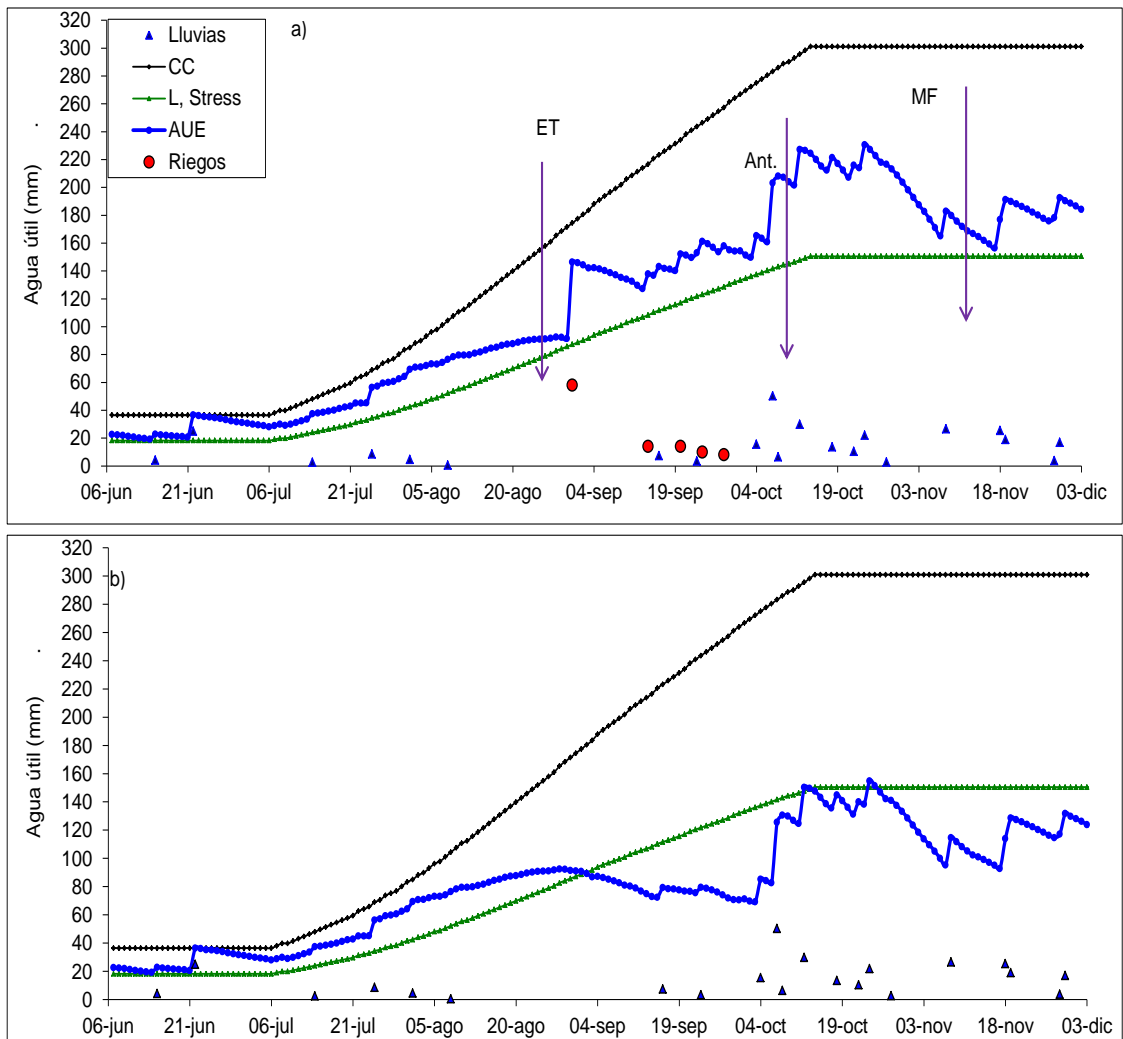


Figura 4.6. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3004, fecha de siembra temprana (Te) con riego (a) y en seco (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente) ET (Espiquilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiologica (MF). Año 2011.

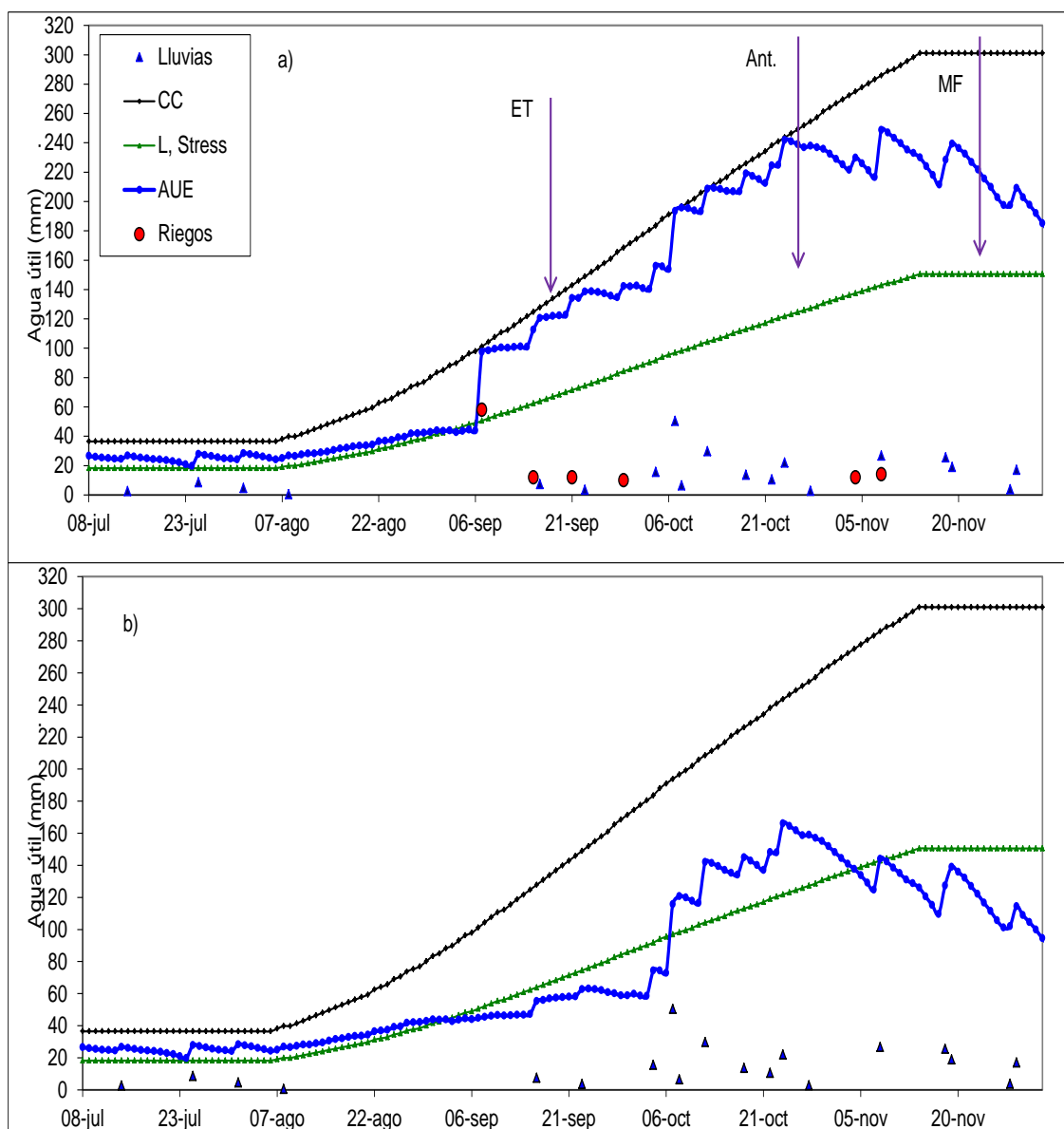


Figura 4.7. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar Biointa 3004, fecha siembra intermedia (I) con riego (a) y en seco (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiquilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2011.

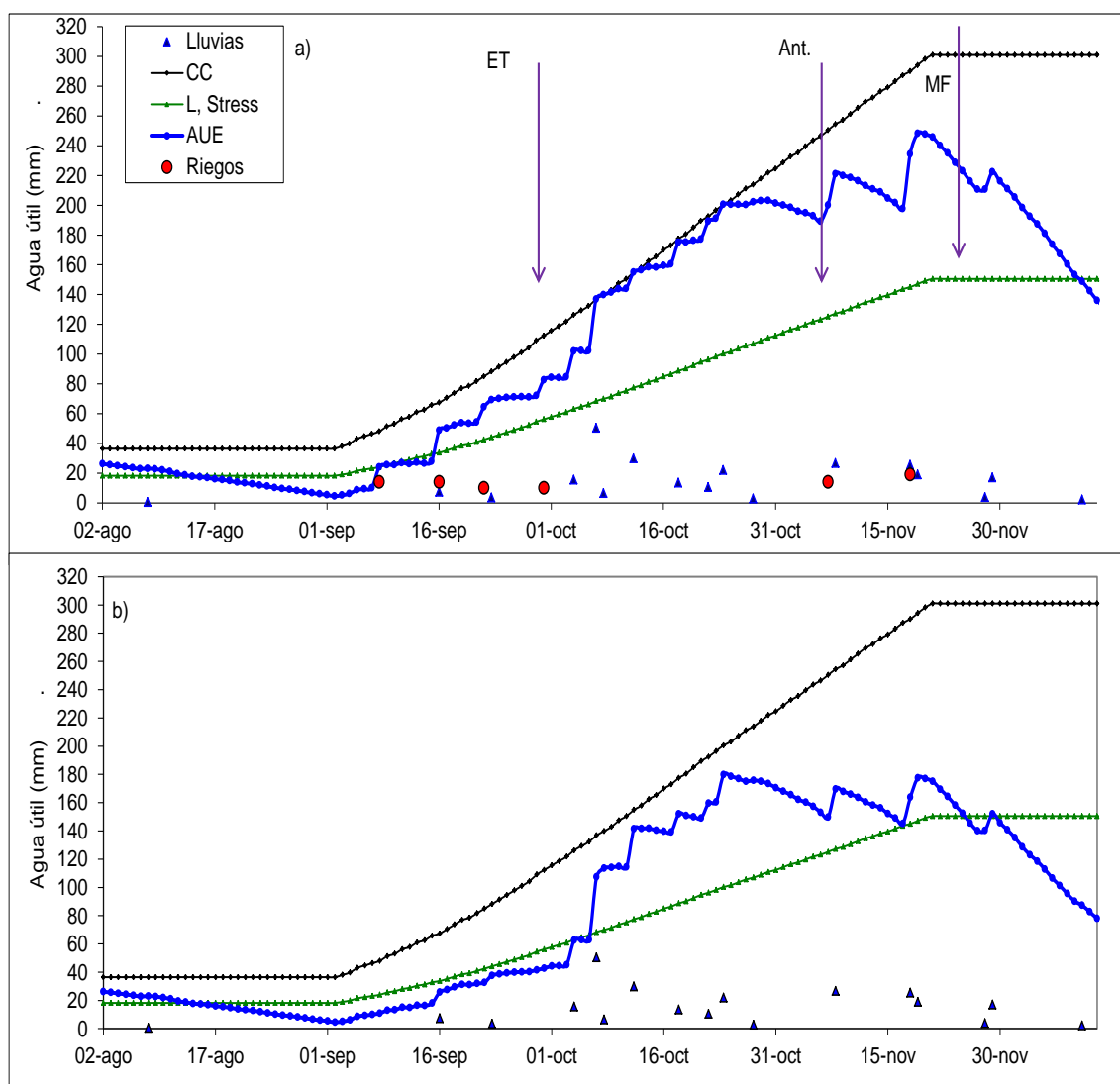


Figura 4.8. Balance Hídrico del suelo (mm) en trigo, cultivar BioInta 3304, fecha siembra tardía (Ta) con riego (a) y en seco (b), CC (capacidad Campo), L.Stress (Limite estrés), AUE (agua útil existente), ET (Espiguilla Terminal), Ant. (Antesis), Madurez Fisiológica (MF). Año 2011.

4.3.3 Rendimiento, sus componentes numéricos y brechas de producción

El rendimiento del cultivo de trigo fue altamente significativo en la triple interacción de A x Fs x R-S ($P < 0,01$, Tabla 4.4). En ambos años de estudio el máximo rendimiento logrado en el tratamiento bajo riego fue en la Fs Te, 6.964 kg ha^{-1} (2010) y 7.338 kg ha^{-1} (2011, Tablas: 4.5 y 4.6). La Fs Te superó en promedio a las Fs I y Ta del 2010 en un 11 y un 22 %, en tanto que en el 2011 fue un 16 y un 38 % superior a las otras dos fechas de siembra. En la Fs Te, el cultivar de mayor rendimiento fue Baguette 17 con 7.481 kg ha^{-1} en el 2010 y Baguette 9 con 7.995 kg ha^{-1} en el 2011, en ambos casos sin limitantes en la disponibilidad hídrica. Con el atraso en la fecha de siembra en el 2010 la merma del rendimiento fue menor en ausencia de limitante en la disponibilidad de agua, variando según el cultivar desde 3,8

kg día⁻¹ (Biolnta 3004), 8,6 kg día⁻¹ (Baguette 9) y 10,2 kg día⁻¹ (Baguette 17) en comparación con el tratamiento en seco donde los valores fueron mayores (Biolnta 3004: 24,5 kg día⁻¹, Baguette 9: 29 kg día⁻¹, y Baguette 17: 31,6 kg día⁻¹).

Tabla 4.4. Análisis de Varianza para rendimiento (kg ha⁻¹), número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha⁻¹), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC), y número de espiga por metro cuadrado (NE). Años 2010 y 2011.

	Análisis de Varianza (P<)					
	RTO	NG	PMG	NE	BT	IC
Año (A)	0,01	0,05	0,01	0,10	0,02	0,06
Fecha Sbra (FS)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01
Cultivar (Cu)	0,03	< 0,01	< 0,01	0,01	0,11	< 0,01
Riego-Secano (R-S)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
A * FS	0,61	0,37	< 0,01	< 0,01	0,01	< 0,01
A * Cu	0,01	0,06	0,61	0,50	0,01	0,01
A * R-S	0,05	0,35	0,02	0,38	0,01	0,04
FS * Cu	0,07	0,43	0,01	0,16	0,26	0,01
FS * R-S	0,01	0,04	0,84	0,36	0,08	0,27
Cu * R-S	0,27	0,28	0,13	0,22	0,20	0,15
A * FS * Cu	0,41	0,29	< 0,01	0,06	0,33	0,29
A * FS * R-S	0,01	0,20	0,01	0,20	0,01	0,92
FS * Cu * R-S	0,71	0,85	0,01	0,72	0,38	0,01
A * FS * Cu * R-S	0,56	0,81	0,02	0,16	0,25	0,10

En cambio en el 2011 la tasa de caída del rendimiento en los tratamientos con y sin riego fue mayor en Baguette 9. Este genotipo perdió 67 kg día⁻¹ en condiciones de riego y 71 kg día⁻¹ en seco por cada día de atraso en su implantación, mientras que en los otros dos cultivares estas reducciones en el rendimiento fueron menores. De esta manera, estas disminuciones fueron de 63 kg día⁻¹ en Baguette 17 y de 26 kg día⁻¹ en Biolnta 3004 en condiciones de riego y en seco fueron de 42 y 28 kg día⁻¹ respectivamente.

La brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable en seco del 2010 fue de 831 y 739 kg en las Fs Te e I, representando un 12 % y de 2.499 kg en la Ta (del 39 %), mientras que en 2011 estas brechas fueron de 482, 1.019 y 212 kg (representando un 7, 16 y un 5 %) en las Fs Te, I y Ta.

Tabla 4.5. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13,5 % humedad en trigo, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número espigas por metro cuadrado (NE) con riego (R) y secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, (ES= error estándar de la media). Año 2010.

Fecha Sbra	RTO		NG		PMG		NE		BT		IC							
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S						
Te	6.964	6.133	16.028	13.451	43,5	44,6	593	520	17.433	14.408	0,31	0,34						
I	6.185	5.446	15.135	13.353	41,9	41,1	615	523	18.902	13.817	0,33	0,35						
Ta	6.358	3.859	15.831	10.409	40,5	37,5	501	458	15.263	10.815	0,35	0,38						
ES	358		1.112		0,49		26,7		585		0,009							
Cu	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9			
Fecha Sbra																		
Te	5.940	6.948	6.757	14.568	16.443	13.209	39,8	41,2	51,2	586	597	488	15.897	15.707	16.158	0,29	0,33	0,36
I	5.593	5.635	6.218	15.100	14.630	13.002	37,0	38,6	48,8	549	582	575	15.807	15.271	18.001	0,33	0,34	0,37
Ta	4.803	5.272	5.250	13.322	14.334	11.704	35,7	36,5	44,7	458	516	465	12.258	12.853	14.025	0,34	0,38	0,38
ES	368			2.154			0,94			32,8			867			0,01		
R	6.502		15.665		42,4		570		17.199		0.33							
S	5.146		12.404		41		500		13.014		0.36							
ES	189		718		0,31		15,5		409		0,005							

Tabla 4.6. Promedios de rendimiento (kg ha^{-1}) corregido al 13.5 % humedad en trigo, número de granos por metro cuadrado (NG), biomasa total (kg.ha^{-1}), peso de mil granos (g), índice de cosecha (IC) y número espigas por metro cuadrado (NE) con riego (R) y secano (S) en tres fechas de siembra en Oliveros, (ES= error estándar de la media). Año 2011.

Fecha Sbra	RTO		NG		PMG		NE		BT		IC							
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S						
Te	7.338	6.856	17.389	16.569	41	38,8	619	540	17.392	15.042	0,35	0,39						
I	6.497	5.478	17.224	14.776	38,5	37,6	588	483	14.842	14.433	0,38	0,41						
Ta	4.532	4.320	14.388	13.680	33,1	31,1	606	500	12.847	8.306	0,31	0,37						
ES	296		855		0,86		29,9		667		0,008							
Cu																		
Fecha Sbra	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9	Bioln	Bag. 17	Bag 9			
Te	6.391	6.994	7.967	16.345	16.810	17.782	38,9	39,2	41,7	566	599	573	16.833	16.111	15.706	0,35	0,39	0,39
I	5.914	6.177	5.871	17.569	17.296	13.136	33,6	35,7	44,8	515	567	525	16.002	14.118	13.793	0,38	0,40	0,40
Ta	4.918	4.119	4.243	15.834	14.335	11.934	31,4	29,7	35,3	545	549	566	11.131	9.391	11.207	0,35	0,36	0,32
ES	600		1.819		1,41		32,2		796		0,01							
R	6.136		16.643		37,5		604		15.027		0,35							
S	5.551		15.008		35,9		507		12.594		0,39							
ES	200		606		0,46		15,2		354		0,005							

El número de granos por unidad de superficie explicó el 44 % de la variabilidad en el rendimiento ($R^2= 0.44$, Figura 4.9), el máximo valor alcanzado se dio en la Fs Te de ambos años, 16.028 NG (2010) y 18.317 NG (2011, Tablas 4.5 y 4.6). La Fs Te del 2010 superó a las Fs I y Ta en un 4 y un 11 %, y en el 2011 esta misma Fs Te fue un 8 y un 10 % mayor. Entre los cultivares el que más se destacó en la Fs Te del 2010 y 2011 fue Baguette 17 (Tablas 4.5 y 4.6). Estadísticamente fue significativa la interacción de Fs x R-S ($P=0.04$, Tabla 4.4), de esta manera las brechas entre los tratamientos (con y sin riego) para el NG fueron de un 16, 12 y un 34 % en las Fs Te, I y Ta del 2010, y en el 2011 estas fueron de: un 5, 14 y 5 %.

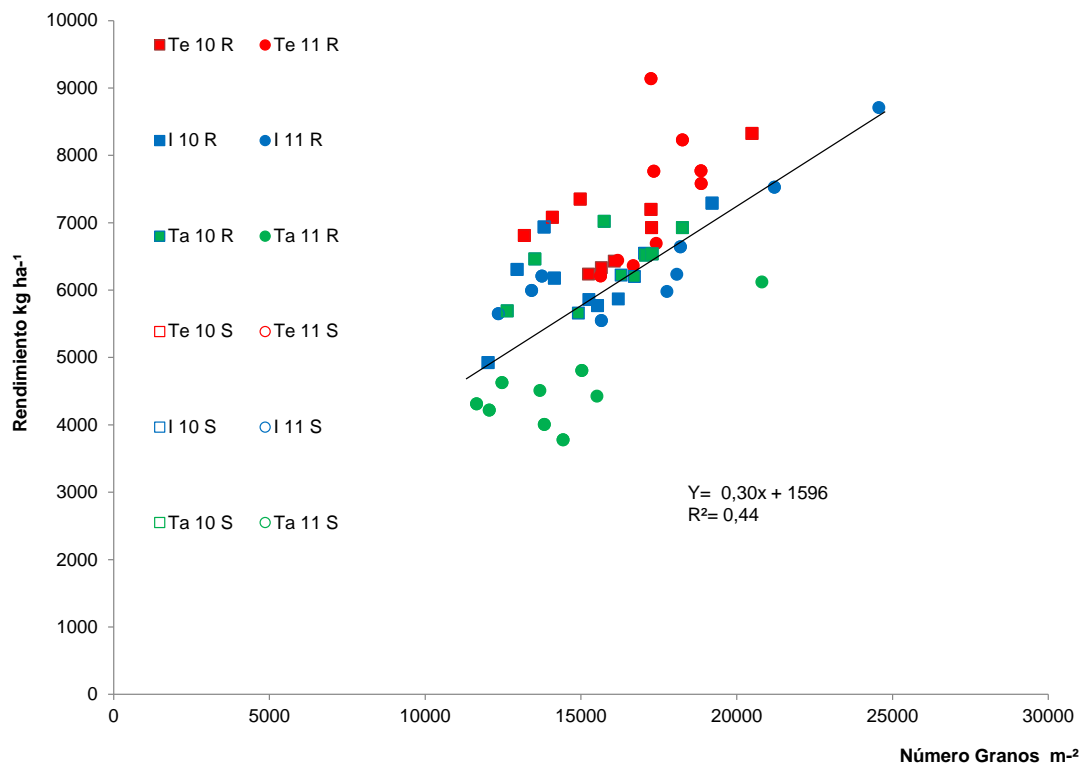


Figura 4.9. Relación entre el número de granos por metro cuadrado y el rendimiento en el cultivo de trigo, en tres fechas de siembra y dos años de evaluación (2010 y 2011). Símbolos llenos con riego (R) y símbolos vacíos en seco (S).

Respecto al número de espigas por unidad de superficie (NE), el mayor valor promedio se dio en el tratamiento en seco del 2011 con 619 espigas m^{-2} en comparación con el mismo tratamiento del 2010 cuyo valor fue 593 espigas m^{-2} (Tablas 4.5 y 4.6). La interacción de Año x Fs dio diferencias significativas ($P < 0.01$, Tabla 4.4). Entre cultivares la que se destacó en el 2010 en las tres fechas de siembra, fue Baguette 17 en el tratamiento regado. En este sentido, en la Fs Te Baguette 17 superó entre un 6 y un 26 % a BioInta 3004 y Baguette 9, en tanto que en las Fs I y Ta las superó en un rango de 1 a 13 %. La brecha entre los tratamientos con y sin disponibilidad hídrica durante el 2010 fue de un 12, 15 y 9 %, mientras que en el 2011 fueron de un 13, 18 y 17 % en las Fs Te, I y Ta.

En cuanto al peso de mil granos, la interacción de A x Fs x Cu x R-S ($P > 0.02$, Tabla 4.4) fue estadísticamente significativo. Esta componente del rendimiento en promedio fue mayor en el año 2010 que en el 2011 (41,7 g vs 36,7 g). La Fs con el máximo valor en el PMG fue la Te de ambos años, siendo superior en un 6 y un 11 % a las Fs I y Ta del 2010, en tanto que en el 2011 fue un 5 y un 16 % mayor a las otras dos Fs. En el análisis por año

se encontró que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos con y sin riego en las tres fechas de siembra (Tablas 4.5 y 4.6) con excepción de la Fs Ta del 2010 donde si hubo diferencias (en promedio Ca. 4 g). En el 2011 la Fs Ta fue diferente estadísticamente de las otras dos Fs.

Dentro de los cultivares, el que mayor PMG alcanzó en la Fs Te del 2010 fue Baguette 9 (51,2 g.) y le siguió Baguette 17 (41,2 g.), observándose la misma tendencia en las otras dos Fs (Tabla 4.5). En 2011, estos cultivares se comportaron de igual forma que en el 2010 pero con un menor PMG (Baguette 9: 41,7 g y Baguette 17: 39,2 g en la Fs Te, Tabla 4.6). En la Fs Te e I del 2010 la brecha fue del 2 % mientras que en la Fs Ta esta brecha en el PMG fue de un 10 %. Respecto a la brecha del año 2011 fue de 5, 2 y 6 % para las Fs Te, I y Ta.

4.3.3.1 Brechas de Rendimiento y sus componentes

Las brechas relativas corresponden al promedio por cultivar, fecha de siembra y año. Se observó que las brechas de rendimiento durante el 2010 se incrementaron con el atraso en la fecha de siembra, con lo cual para la Fs Te el porcentaje de la brecha del rendimiento potencial fue de 11,9%, en la Fs I fue de un 12 % y en la Ta fue de 39 %. Sin embargo en el 2011 las brechas no presentaron la misma tendencia. En este segundo año de estudio el mayor valor observado de brecha de rendimiento fue en la Fs I con un 15 %, en tanto que en las Fs Te y Ta fueron menores (4,7 y 7 %). En la Fs Ta del 2010 los tres cultivares presentaron altos valores de la brecha de rendimiento variando desde un 41,7 % (Baguette 17) a 35,6 % (Baguette 9, Figura 4.10a panel izquierdo).

Las brechas en el NG presentaron un patrón similar al rendimiento. En el 2010 la menor brecha en el NG se dio en la Fs I (11,7 %) en comparación a las Fs Te y Ta (15, 7 y 34,1 %). En la Fs Ta del 2010, entre cultivares Baguette 17 presentó diferencias estadísticamente significativas (36,6 %) respecto de BioInta 3004 (33,3 %) y Baguette 9 (32,5 %, Figura 4.10b panel izquierdo). Respecto a las brechas en el NG del 2011, las de menor magnitud para este año fueron la Fs Te y Ta con 4,5 y 4,7 % vs la Fs I con 12,6 %. En esta Fs I hubo diferencias significativas entre los cultivares variando entre 0,6 a 25,5 % (Figura 4.10b panel derecho).

Las brechas relativas en el NE se comportaron diferentes en cada año de esta tesis, es decir en promedio en el 2010 las brechas de menor magnitud se dieron en la Fs Ta (8,3 %), en tanto que en el 2011 el menor valor se dio en la Fs Te (12,6 %). Por otro lado las brechas para el NE fueron mayores en la Fs I de los años (14,8 y 17,7 %) respecto a las otras fechas de siembra, siendo de mayor magnitud en el 2011 con valores por arriba del 20

% . Entre cultivares en la Fs I del 2011 fue Baguette 9, quien se diferenci6 significativamente (21,9 %) de BioInta 3004 (11,4 %, Figura 4.10c panel derecho). El PMG fue la componente del rendimiento con los menores valores de brecha respecto a las dem6s componentes. En este sentido el m6ximo valor de brecha se dio en Baguette 9 de la Fs Ta con el 11, 6 % en el 2011 y de 10,3 % para la misma Fs del 2011. (Figura 4.10 d).

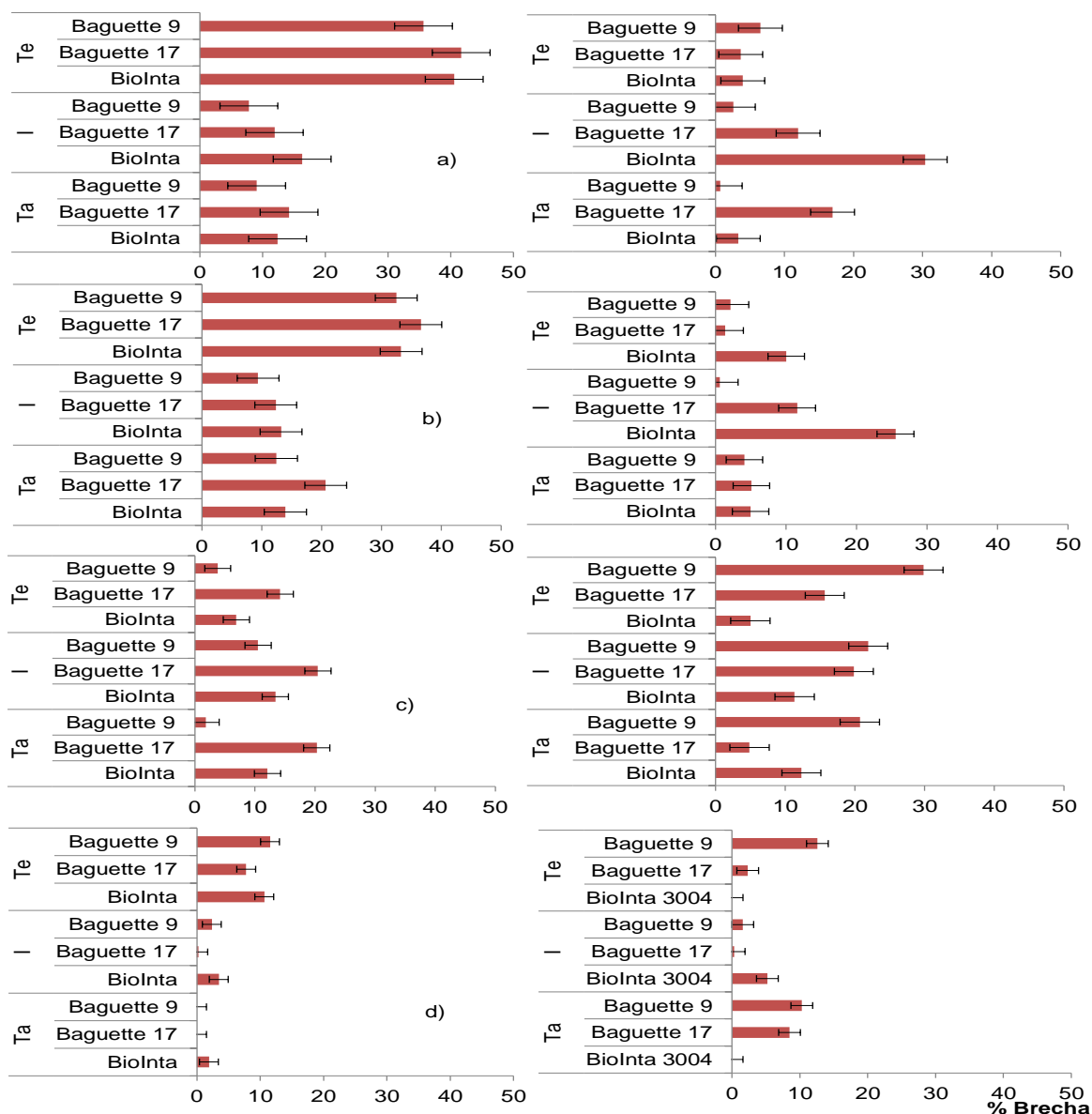


Figura 4.10. Brechas relativa de rendimiento (a), n6mero granos por metro cuadrado (b), n6mero espigas por metro cuadrado (c) y peso mil granos (d) en el cultivo de trigo, en funci6n de tres fechas de siembra y tres cultivares. A6os 2010 (panel izquierdo) y 2011 (panel derecho).

4.3.3.2 Producción de Biomasa e Índice de Cosecha

Independientemente del año y la fecha de implantación, la mayor cantidad de biomasa total se observó en los tratamientos bajo riego respecto del tratamiento en seco (Tablas 4.5 y 4.6). La interacción entre A x Fs x R-S fue significativa ($P < 0.01$, Tabla 4.4). En 2010, la Fs con el máximo valor promedio fue la I, superando a la Te y Ta en un 8 y un 21%. En cambio, en el 2011 la Fs Te tuvo el mayor valor de BT respecto de las Fs I y Ta (10 y 35 %). Entre cultivares la que se destacó en el 2010 fue Baguette 9 cuyo promedio en las Fs I y Ta fue de 18.001 y 14.025 kg ha⁻¹ (Tabla 4.5), mientras que en el 2011 fue BioInta 3004 en las Fs Te e I (valor promedio: 16.833 y 16.002 kg ha⁻¹, Tabla 4.6). Las brechas fueron mayores en la medida que se atrasó la fecha de siembra, de esta forma en 2010 la magnitud de la brecha fue de 17, 27 y 29 % mientras que en el año siguiente fue de 13, 3 y 35 % en las Fs Te, I y Ta, respectivamente.

El índice de Cosecha fue significativo estadísticamente en la interacción de A x Cu x R-S ($P = 0.01$, Tabla 4.4). En general, el IC en el tratamiento en seco fue en todas las fechas de siembra mayor al tratamiento bajo riego (Tablas 4.5 y 4.6). La diferencia de medias entre estos tratamientos fue significativa ($P < 0.01$) en los dos años de evaluación. La mayor brecha del IC se dio en la Fs Ta del 2011 (R: 0,31 vs. S: 0,37, Tabla 4.6).

4.4 Discusión

Los rendimientos potenciales de trigo estimados por Aramburu Merlos (2015) en el atlas mundial de brechas de rendimiento para la zona sur de Santa Fe fueron de 6.800 a 7.000 kg ha⁻¹. Estos valores fueron coincidentes a los rendimientos potenciales obtenidos en esta tesis en la Fs Te. En tanto que los rendimientos máximos alcanzados en condiciones de seco en este trabajo de tesis superaron a los que estimó este mismo autor (4.800 a 5.500 kg ha⁻¹) en ca. 1.000 kg ha⁻¹ en la Fs Te. Sin embargo demostraron ser similares a los obtenidos en la Red de cultivares de Trigo del Sur de Santa Fe en Oliveros para las fechas de siembra Te e I (7.000 y 5.800 kg ha⁻¹) correspondientes al periodo 2010-2011 (Castellarín et al., 2014). Es probable que estas diferencias en los RAs entre los que establece Aramburu Merlos, Castellarín y este trabajo de investigación sean por cuestiones de manejo del cultivo y principalmente por la distribución de las lluvias ocurridas dentro del periodo considerado o también pueda deberse a que en el caso de Aramburu Merlos tomó un mayor periodo en la estimación del rendimiento RAs (2005/06 al 2011/12).

Las precipitaciones del 2011 fueron superiores al 2010 durante el ciclo completo del cultivo (mayo a noviembre). Éstas se concentraron mayormente en los dos últimos subperiodos (A y dA-MF) de la Fs Te, estando un poco por encima del promedio histórico en

un 6 % y en el periodo de antesis de la Fs I de ese mismo año (donde las precipitaciones fueron superiores en un 22 % a la serie histórica). En cambio las precipitaciones del 2010 dentro de estos mismos subperiodos estuvieron en un rango entre un 52 y 66 % inferior al promedio histórico según la Fs. Por otro lado el segundo año de estudio (2011) se vio favorecido por una mayor acumulación de radiación solar incidente respecto al primer año y superó el promedio histórico entre un 3 % y 4 % en las fechas de siembra Te e I (Balbi et.al, 2013).

Respecto a la temperatura media alrededor de antesis, la Fs Te fue de 17 °C, incrementándose a razón de un grado con el atraso en la Fs I y Ta. Sin embargo en las tres fechas de siembra estuvieron dentro del rango óptimo de crecimiento (15-25 °C, Fischer y Maurer, 1976). Incrementos en la temperatura aceleran la tasa de desarrollo del cultivo y el periodo de crecimiento de la espiga, reduciendo la acumulación de fotoasimilados (Wardlaw et al., 1980; Nicolas et al., 1984). La literatura científica cita que por cada grado de aumento de la temperatura media por encima de los 15 °C, el rendimiento se ve afectado negativamente entre un 4 y un 10 % (Wardlaw et al., 1989; Magrín et al., 1993)

En cuanto a la Fs Ta de los dos años de estudio los rendimientos potenciales fueron elevados conforme a lo que se esperaba acorde a la fecha de siembra (fines de julio: 6.000 kg ha⁻¹ en el 2010 y principios de agosto: 4.500 kg ha⁻¹ en el 2011). Las diferencias entre los rendimientos máximos obtenidos bajo riego en los dos años de esta Fs Ta (teniendo en cuenta que no hubo limitantes hídricas ni nutricionales) podría deberse en parte al efecto de una reducción en la duración en grados días del periodo de antesis como también así a la radiación acumulada en el mismo periodo, que fue menor en el 2011. Durante este periodo en las Fs Ta de ambos años, las temperaturas medias fueron de 19 y 20,2 °C mientras que las temperaturas máximas fueron similares (26,1 y 26,4 °C). Estos valores representaron un incremento en la temperatura máxima de un 10 y un 15 % respecto a la Fs Te. Por otro lado además, en el 2011 la temperatura máxima en el periodo de llenado de granos también fue mayor que en el 2010 repercutiendo negativamente en el rendimiento.

En cuanto a la radiación solar acumulada en antesis, el año 2010 fue superior al 2011 en un 17 % y la duración en grados días de este periodo fue un 20% mayor al 2011. Con respecto a esta fecha de siembra tardía (fines julio-principios agosto) no existen datos de referencia en la zona que permita comparar los resultados obtenidos en esta tesis, por lo que se podría inferir que los altos rendimientos logrados sin limitaciones hídricas fueron consecuencia de un manejo óptimo del cultivo (sin limitaciones hídricas ni nutricionales) sumado a la mejora genética de los cultivares utilizados. En este sentido Anderson (2010) y Zhang y col. (2006) en estudios realizados en la parte occidental y sur de Australia

concluyeron que los cultivares disponibles en el mercado actual pueden alcanzar las 7-8 tn ha⁻¹ en condiciones de secano según sea la región.

Entre los cultivares, los que mayores rendimientos lograron en la Fs Te de ambos años fueron los Baguette 17 y 9 mientras que en las otras dos fechas de siembra (I y Ta) no se destacó ninguna de las tres. Por otro lado estos rendimientos potenciales obtenidos fueron similares a los estimados por Menéndez y Satorre (2007) para la zona de Balcarce (Pcia de Buenos Aires) y a los rendimientos potenciales del Sur de Australia (entre 5 y 8 tn ha⁻¹, Zhang et al., 2006). En estudios más recientes Abbate (2018) registró en el área de Balcarce un grupo de cultivares con un rendimiento potencial de 12 tn ha⁻¹ y 10 tn ha⁻¹ en condiciones de secano. Zhang y col. (2006) atribuyen que la conjunción de mayores precipitaciones y períodos de crecimientos del cultivo de trigo más largos favorecerían la obtención de altos rendimientos potenciales. El factor climático antes mencionado determinará el tamaño de la brecha dentro de un área (Asseng et al., 2001).

El Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento estimó para el Sur de Santa Fe una brecha alrededor del 41 % entre el RAs y el rendimiento actual y entre el rendimiento potencial y el RAs una brecha del 30 %. En cuanto al análisis de brechas de rendimiento que se realizó en esta tesis (RP y RAs), éste dio como resultado valores menores al citado variando en un rango de 9 a 21 % según la fecha de implantación y el año (promedio de las tres fechas de siembra). No obstante el incremento de la brecha hacia las fechas de siembras tardías solo se observó en el primer año de estudio con un valor de 39 %, y en el 2011 la mayor brecha de rendimiento se dio en la Fs I con un 15 %. En consecuencia, las siembras tempranas al tener una mayor duración del ciclo obtuvieron los rendimientos más altos y fueron más estables en la producción de granos por un mayor aprovechamiento principalmente de la radiación incidente y de temperaturas más templadas que las implantaciones tardías que presentaron una mayor variabilidad.

El componente NG presentó los mayores valores en el tratamiento regado de la Fs Te de ambos años. La respuesta de esta variable (NG) frente a los cambios en la fecha de implantación fue de reducir el NG en correlación con el rendimiento potencial (Abbate et al., 1997; Savin and Slafer, 1991; Fischer, 2008). De esta manera el NG promedio de la Fs Te del 2010 se redujo con el atraso en la implantación en un 5 y 11 % respecto a las Fs I y Ta, mientras que en el 2011 esta reducción fue de un 16 y 38 %. Estos valores potenciales de NG en las Fs Te e I fueron coincidentes con los obtenidos por Fischer (1993) en experimentos con dosis alta de nitrógeno en distintos momentos de desarrollo del trigo y por Menéndez y Satorre.(2007) (16.700-18.900 granos) para la zona entre Pergamino y Balcarce. Estos autores estimaron para la localidad de Oliveros un menor NG (14.400

granos) y un menor RP (5.331 kg ha^{-1}) por cuestiones geográficas (hacia el norte de Bs As la radiación solar incidente es menor y la temperatura media es mayor). En este sentido en ausencia de limitaciones hídricas y nutricionales, los factores climáticos como la temperatura y la radiación solar son claves para un buen desarrollo y crecimiento. Lázaro y Abbate (2012) establecieron una relación entre el NG y el Q (coeficiente fototermal: relación entre la radiación incidente solar media y la temperatura diaria media menos la temperatura de base que es $4,5^{\circ}\text{C}$ alrededor de antesis) que permite estimar el NG frente a cambios en el ambiente (fechas de siembra, sitio o año). Según Castellarin et al., (2018) el coeficiente fototermal para el área de Oliveros varía entre $0,65$ y $0,80 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$. Este mismo autor estableció que en años con un Q mayor a $0,80 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$ se obtienen altos rendimientos

En el caso de la Fs I del 2010 el NG potencial obtuvo un menor valor respecto al NG potencial de la Fs Ta por una menor disponibilidad de agua en el periodo crítico del cultivo donde a pesar de los riegos complementarios no logró superar a la Fs Ta en el tratamiento con riego, esta fecha siembra en condiciones de secano atravesó todo el ciclo con estrés hídrico a diferencia del tratamiento con agua que fue regado desde el periodo vegetativo, en tanto que la Fs I para este mismo tratamiento comenzó a regarse con posterioridad es decir en estado de macollaje.

Con respecto al subcomponente del rendimiento el NE la mayor disponibilidad de agua y nutrientes en el tratamiento bajo riego se tradujo en incrementos en ambos años (nitrógeno, Salvagiotti et al., 2008, Abbate et al., 1995). Según Slafer y col. (2003) esta condición del cultivo permitió una mayor disponibilidad de fotoasimilados durante el periodo de macollaje (NE). El mayor NE se dio en la Fs Te del 2011 con disponibilidad hídrica respecto del año 2010 para la misma Fs, al igual que sucedió con el Rto. En línea con lo ocurrido en el Rto. y el NG, el PMG también maximizó su valor en las Fs Te de ambos años, disminuyendo con el atraso en la implantación del cultivo, esto probablemente sea por el incremento de las temperaturas mínimas y máximas durante el periodo de llenado de granos (Menéndez y Satorre, 2007). Los valores logrados en el PMG en este trabajo estuvieron dentro del rango (PMG 21-40 g.) obtenido por Gonzalez Montaner, et al., (1997) en un ensayo con dosis creciente de nitrógeno para el sudeste de la Pampa Argentina. Estos autores determinaron que si el NG era inferior a 14.400 NG , el PMG lograría alcanzar los 44 g y viceversa como consecuencia de un efecto de competencia por asimilados (Borrás et al., 2004, Gonzalez Montaner et al., 1997). En este estudio los valores más altos del PMG se dieron en las tres fechas de siembra del 2010. Esto posiblemente sea porque el cultivo tuvo una mayor duración en el periodo de llenado de granos debido a las temperaturas mínimas

que fueron menores al registro histórico de 30 años y al año 2011. Sin embargo, este efecto de un mayor PMG en el 2010 no alcanzó a superar los rendimientos del año 2011, ya que claramente se pudo observar que a mayor NG, el PMG fue menor (Miralles et al., 1995)

La biomasa total generada por el cultivo mostró incrementos en los tratamientos sin limitantes hídricas en todas las fechas de siembras aunque no se observó una correlación positiva con el rendimiento (Calderini et al., 1999, Slafer et al., 1994). Es de resaltar que durante el 2010, el cultivo generó una mayor biomasa en condiciones potenciales que el 2011. Esto podría deberse a que durante la etapa vegetativa las precipitaciones acumuladas fueron mayores y las temperaturas mínimas menores alargando la duración de este periodo como se explicó con anterioridad. Por otro lado, el segundo año en condiciones de secano tuvo una mayor BT en las tres Fs en comparación con el mismo tratamiento del año anterior. Esto podría deberse a que a diferencia del año 2010, a pesar de haber acumulado una menor cantidad de agua de lluvias en la etapa vegetativa, tuvo una mejor oferta de radiación (Green et al., 1989; Gallagher and Biscoe, 1978) lo que tradujo en una mayor producción de biomasa. La máxima BT de esta tesis se obtuvo en el tratamiento bajo riego de la Fs I del 2010 (Ca. 19.000 kg ha⁻¹) y en los restantes tratamientos los resultados fueron similares a los obtenidos por Calderini et al., 1995 (13.000 a 19.000 kg ha⁻¹).

Los IC correspondientes a los tratamientos regados fueron menores en comparación a los tratamientos en secano en las tres fechas de siembra. Esto fue consecuencia de una mayor partición de asimilados hacia los órganos reproductivos que a las estructuras vegetativas (Slafer y Andrade, 1991; Calderini et al., 1999). El mayor IC fue cercano al límite superior para los trigos primaverales de uso actual (0,40-0,50, Fischer, 2007; Sadras and Lawson, 2011).

La brecha relativa del rendimiento fue cercana al 40 % en la Fs Ta del 2010, correlacionándose con la brecha en el NG de la misma fecha de siembra, producto del estrés hídrico que atravesó el cultivo desde etapas tempranas. En cambio en las otras fechas de siembra (Te e I) del 2010 y en las tres fechas de siembra del 2011 esta brecha de rendimiento y sus componentes (NG, PMG, NE) no superaron el 20 %. El PMG fue el componente con los menores valores de brecha demostrando su mayor estabilidad frente al NG y NE.

4.5 Conclusiones

3a) La primera parte de la hipótesis donde se plantea que las siembras tempranas maximizan el rendimiento potencial debido a que el periodo alrededor de antesis es expuesto a una temperatura media menor respecto a las fechas siembras más tardías y con una menor radiación solar incidente se acepta ya que los máximos rendimientos se lograron en estas fechas de siembra en ambos años, asociados a mayores incrementos en el número y peso de los granos.

3b) La brecha de rendimiento fue mayor en la siembra tardía únicamente en el primer año por lo tanto esta parte de la hipótesis se rechaza.

3c) En cuanto a la hipótesis que establece que el número de granos por unidad de superficie sería el componente que mejor reflejara las brechas de rendimiento se acepta, ya que mostró el mismo patrón de incremento al atrasar la fecha de siembra que lo observado con las brechas de rendimiento.

Las brechas de rendimiento y sus componentes fueron en promedio menores al 20 % en las tres fechas de siembra, variando en un rango entre 0 y 39 %. No obstante en las fechas de siembras tempranas fue donde el rendimiento fue mayor, por ende si se quiere maximizar el rendimiento potencial debería apuntarse a estas fechas donde ofrecen una mayor productividad y estabilidad en el rendimiento.

4.6 Bibliografía

Abbate, P. 2018. Trigo pan: identifican cultivares que baten récords de rendimiento. Noticias INTA: <https://inta.gob.ar/noticias/>.

Abbate, P., Cardós, M. y Capaña, Leda. 2017. Capítulo 1: El trigo, su difusión, importancia como alimento y consumo. Manual del Cultivo de Trigo. Editores Divito, G. y García, F. 1a ed. Compendiada. Acassuso: International Plant Nutrition Institute, 2017. Págs. 7-19.

Abbate P., Andrade F, Culot J. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. Journal of Agriculture Science (Cambridge) 124, 351-360.

Acuña, T., Dean, G., Rifkin, P. 2011. Contrast to achieve high potential yield of wheat in a temperate, high rainfall environment in south-eastern Australia. Crop and Pasture Science, 62: 125-136.

Albrech, R., Andriani, J., Castellarin, J., Cencig, G., De Emilio, M., Ferraguti, F., Keller, O., Malmantile, A., Martins, L., Pagani, R., Quaino, O., Rossi, J., Rosso, O. y Tentino, N. 2010. Comportamiento de cultivares de trigo pan en diferentes ambientes del centro-sur de Santa Fe. Campaña 2009/10. Revista Para Mejorar la Producción N° 43, pag 13-25. INTA EEA Oliveros.

Albrech, R., Castellarin, J., Ferraguti, F., Malmantile, A., Martins, L., Pedrol, h., Perez, D., Quaino, O., Rossi, J., Rosso, O. y Tentino, N. 2009. Comportamiento de cultivares de trigo pan en diferentes ambientes del centro-sur de Santa Fe. Campaña 2008/09. Revista Para Mejorar la Producción N° 40, pag 13-25. INTA EEA Oliveros

Anderson, W. 2010. Closing the gap between actual and potential yield of rain fed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. Field Crops Research, 116: 14-22.

Aramburu Merlos, F., Monzón, J., Mercau, J., Taboada, M., Andrade, F., Hall, A., Jobbagy, E., Cassman, K., Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. Field Crops Research, 184: 145-154.

Asseng, S., Turner, N., Keating, B. 2001. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant Soil*, 233: 127–143.

Bahícu 1.02, Balance hídrico de cultivos www.inta.gov.ar/Oliveros. 2013.

Balbi, C., Rodríguez, E., Neiff, N. 2013. Tasa de crecimiento de espigas de trigo (*Triticum aestivum*) en diferentes niveles de radiación incidente en Corrientes. *Revista Agrotecnia* 21 (2013).

Beche, E., Benin, G., Lemes Da Silva, C., Berger Munaro, L., Marchese, J. 2014. Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, 61: 49-59.

Berry P, Sylvester-Bradley R, Berry S. 2007. Ideotype design for lodging-resistant wheat. *Euphytica*, 154: 165–179.

Borrás, L., Slafer, G., Otegui, M. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean. A quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86: 131-146.

Caviglia, O., Sadras, V. and Andrade, F. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research*, 87:117-129.

Calderini, D., Reynolds, M., Slafer, G. 1999. Genetic gains in wheat yield and associated physiological changes during the twentieth century. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Ed.), *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. The Haworth Press, pp. 351-377.

Calderini, D., Dreccer, M. and Slafer, G. 1995. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breed.* 114: 108-112.

Calderini, D., Torres Leon, S., and Slafer, G. 1995. Consequences of wheat breeding on nitrogen and phosphorus yield, grain nitrogen and phosphorus concentration and associated traits. *Annual Botany.*, 76: 315-322.

Castellarín, J.; Andriani, J. y Ferraguti, F. 2014. Trigo: caracterización del ambiente, generación del rendimiento y sanidad del cultivo durante la campaña 2013-2014 en Oliveros (Santa Fe). *Cultivos Invernales, Revista Para Mejorar la Producción* N° 51. Pág. 41-45.

Castellarín, J., Andriani, J. y Ferraguti, F. 2012. Trigo. Caracterización del ambiente y determinación del rendimiento durante la campaña 2011/12 en Oliveros (Santa Fe). *Cultivos Invernales, Revista Para Mejorar la Producción* N° 47. Pág. 7-12.

Cox, T., Shroyer, R., Ben-Hui, L., Sears, R. and Martin, T. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Science*, 28: 756-760.

Evans, L., Fischer, R. 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39: 1544-1551.

Fischer, R., Edmeades, G. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Science* 50:85–98.

Fischer, R. 2007. Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *Journal Agriculture Science*, 145: 99-113.

Fischer, R. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research*, 33: 57-80.

Fischer, R. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science* 105: 447–461.

Fischer, R., Maurer, R., 1976. Crop Temperature Modification and Yield Potencial in a Dwarf Spring Wheat. *Crop Science* 16, 855-859.

Gonzalez Montaner, J., Maddoni, G., Di Napoli, M. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Soother Pampa. *Field Crops Research*, 51: 241-252.

Gallagher, J. and Biscoe, P. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal Agriculture Science*, 91: 47-60.

Green, C. 1989. Genotypic differences in the growth of *Triticum aestivum* in relation to absorbed solar radiation. *Field Crops Research*, 19: 285-295.

Hall, A., Richards, R. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research*, 143: 18-33.

Jandel Scientific, 1991. *Table Curve V. 3.0. User's Manual Version 3.0* AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera, CA.

Kirby, E., Appleyard, M. 1984. *Cereal development guide*. NAC Arable Unit, Stoneleigh, Kenilworth, UK, pp. 95.

Levy, J., and Peterson, M. 1972. Responses of spring wheat to vernalization and photoperiod. *Crop Science* 12:487-490.

Littell, R., Milliken, R., Stroup, W., Wolfinger, R. 1996. *SAS system for MIXED models*. SAS Institute, Cary, NC.

Long S, Zhu X-G, Naidu S, Ort, D. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell and Environment* 29: 315–330.

Lu, C., Fan, L. 2013. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain. *Field Crops Research*, 143: 98 -105.

Mackay, I., Horwell, A., Garner, J., White, J., McKee, J., Philpott, H. 2011. Reanalyses of the historic series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. *Theoretical and Applied Genetics*. 22, 225–238.

Magrin, G., Hall, A., Baldy, C., Grondona, M., 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67,29-41.

Menéndez, F., Satorre, E. 2007. Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. *Agriculture Systems*. 95: 1-10.

Ministerio de Agroindustria, 2017. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones.

Miralles, D., Gonzalez, F., Abeledo, L., Serrago, A., Alzueta, I., Garcia, G., de San Caledonio, R., Lo Valvo, P. 2014. Manual de Trigo y Cebada para el Cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo. 1 Editorial Buenos Aires: Orientación Grafica Editora. 56 pág.

Miralles, D. y Gonzalez F. 2009. El trigo en Argentina: perspectivas ecofisiológicas del pasado, presente y futuro para aumentar el rendimiento. XVII Congreso de AAPRESID, La era del ecoprogreso.

Miralles, D. and Slafer, G. 1995. Yield, biomass and yield components in dwarf, semi-dwarf and tall isogenic lines of spring wheat under recommended and late sowing dates. *Plant Breeding*, 114: 392-396.

Nerson, H., Sibony, M., Pinthus, M. 1980. A scale for the assessment of the developmental stages of wheat (*Triticum aestivum* L.) spike. *Annals of Botany*, 45: 203

Nicolas, M., Gleadow, R., and Dealling, M. 1984. Effects of Drought and High Temperature on Grain Growth in Wheat. *Australian Journal Plant Physiology*. 11, 553-566.

Ray, D., Mueller, N., West, P., Foley, J. 2013. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PLoS ONE* 8(6): e66428. doi:10.1371/journal.pone.0066428.

Reynolds M., Foulkes M., Slafer G., Berry P., Parry M., Snape J. y Angus W. 2009. Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60: 1899-1918.

Salvagiotti, F., Miralles, D. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal Agronomy*, 28:282–290.

Sadras, V., Lawson, C. 2011. Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Crop Pasture Science* 62: 533–549

Sayre, K. 1996. The role of crop management research in CIMMYT in addressing bread wheat yield potential issues. In M. Reynolds (Ed.). *Increasing yield potential in wheat breaking the barriers*. CIMMYT Int. Symp. CIANO. Cd. Obregon, Mexico: 203-207.

Savin R, Slafer G. 1991. Shading effects on the yield of an Argentinean wheat cultivar. *Journal of Agricultural Science* 116: 1–7.

Shearman, V., Sylvester-Bradley, R., Scott, R., Foulkes, M. 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Science*. 45: 175-185.

Siddique, K., Belford, R., Perry, M. and Tennant, D. 1989. Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean type environment. *Australian Journal Agriculture Research*. 40: 473-487.

Slafer, G., Miralles, D., Savin, R., Whitechurch, E. y Gonzalez, F. 2003. Capítulo 7: Ciclo Ontogénico, Dinámica del Desarrollo y Generación del Rendimiento y la Calidad en Trigo. En: Satorre, E; Benech Arnold, R.; Slafer, A.; De la Fuente, E.; Miralles, D.; Otegui, M. y Savin R. *Producción de Granos*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA pp. 99-132.

Slafer, G., Satorre, E. and Andrade, F. 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In G Slafer (Ed.), *Genetic Improvement of Field Crops*. Marcel Dekker, New York, pp 1-68.

Slafer, G., Andrade, F. 1991. Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum*) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world. *Euphytica* 58: 37-49.

Slafer, G., Andrade, F., Satorre, E, 1990. Genetic-improvement effects on preanthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research* 23: 255-263.

Wardlaw, I., Dawson, I., Munibi, P., y Fewster, R., 1989. The tolerance of wheat to high temperature during reproductive growth. Survey procedures and general response patterns. *Australian Journal of Agriculture Research*. 40 (1) 1-13.

Wardlaw, I., Sofield, I., and Cartwright, P. 1980. Factors limiting the rate of dry matter accumulation in the grain of wheat grown at high temperatures. *Australian Journal Plant Physiology*, 7:387-400.

Zhang, H., Turner, N., Poole, M., Simpson, N. 2006. Crop production in the high rainfall zones of southern Australia—potential, constraints and opportunities. *Australian Journal Experimental Agriculture*, 46:1035–1040.

ANEXO III

Fotoperiodo Promedio (horas) por subperíodo del cultivo de trigo, por cultivar (Cu) y fecha de siembra. Años 2010 y 2011.

Cu	Fecha Sbra	Subperíodo	Fotoperiodo (hs)	
			2010	2011
BIOINTA 3004	Te	E-prA	11,4	11,7
		A	13,1	13,3
		dA-MF	14,3	14,4
	I	E-prA	12,9	12,2
		A	13,9	13,9
		dA-MF	14,9	14,9
	Ta	E-prA	12,7	12,7
		A	14,0	14,3
		dA-MF	14,7	14,8
BAGUETTE 17	Te	E-prA	11,3	11,5
		A	13,0	13,2
		dA-MF	14,0	14,2
	I	E-prA	11,9	12,2
		A	13,5	13,8
		dA-MF	14,7	14,6
	Ta	E-prA	12,6	12,8
		A	14,0	14,3
		dA-MF	14,6	14,7
BAGUETTE 9	Te	E-prA	11,3	11,5
		A	13,0	13,1
		dA-MF	14,0	14,2
	I	E-prA	11,9	12,1
		A	13,7	13,7
		dA-MF	14,5	14,5
	Ta	E-prA	12,6	12,8
		A	13,9	14,3
		dA-MF	14,6	14,7

CAPITULO 5

CONCLUSIONES FINALES

La importancia del estudio de las brechas de producción de un área permite conocer el máximo potencial productivo y sus variaciones tanto espaciales como temporales. En base a esto se podrán diseñar y desarrollar estrategias de manejo dentro del sistema que permitan incrementar la productividad en forma sostenible.

En la literatura científica mundial y en Argentina las cuantificaciones del Rendimiento Potencial (RP), el Rendimiento Máximo Alcanzable en seco (RAs), el Rendimiento Real (RR) (manejo “promedio” de la tecnología del productor) y las brechas entre estos han sido determinadas a escala regional con el uso de modelos de simulación de cultivos y sistemas de información geográfica. En nuestro país la brecha nacional de rendimiento entre el RP y el RR se estimó en un 58% para trigo y maíz y en un 68% para soja (Aramburu Merlos, 2015). Mientras que las brechas entre el RAs y el RR fueron menores (32% en soja y 41% en maíz y trigo). Estos mismos autores estimaron para la región centro de la pampa húmeda una brecha entre el RAs y el RR en un 28%, 38% y 32% para soja, trigo y maíz, respectivamente. Con lo cual existe un margen para reducir la brecha ante distintas opciones de manejo de los cultivos (asumiendo que las posibilidades de aumento en la producción son menores cuando la brecha es menor al 20%).

El trabajo de esta tesis mostró las variaciones del rendimiento potencial, el rendimiento máximo alcanzado en seco y las brechas entre el RP y RAs en función a distintas opciones de manejo (variaciones en la fecha de siembra y el uso de distintos genotipos en soja, maíz y trigo) en condiciones de campo. Esta brecha toma importancia ante situaciones donde el agua no es una limitante tal como la presencia de napas freáticas cercana a la superficie o sistemas de producción con riegos. De esta manera se observó que los mayores rendimientos se obtuvieron en fechas de siembras tempranas en los tres cultivos, asociados a un año con altas probabilidades de precipitaciones y en general las brechas fueron menores a un 10 %. En contrapartida, en un año con bajas probabilidades de lluvias, las brechas se incrementaron hacia las fechas siembras intermedias y/o tardías.

Las distintas alternativas de manejo, consecuencia de la combinación de genotipos y fechas de siembra probables para la zona del centro-sur de Santa Fe, dieron como resultado brechas relativas que oscilaron entre un 3 y 20 % en soja, entre un 6 y 25 % en maíz y entre un 4 y 39 % en trigo. Las mayores brechas relativas en el cultivo de soja se dieron en las fechas de siembras tardías con un valor promedio de 16 % y en trigo estas mayores brechas de rendimiento rondaron entre un 15 y 39 % en las fechas de siembras intermedias y

tardías. Mientras tanto, en maíz las mayores brechas relativas de rendimiento fueron en las fechas de siembras intermedias y tardías en un rango de 26 y 18 % respectivamente. La magnitud de estas brechas de rendimiento en los tres cultivos (soja, trigo y maíz) tuvieron en común limitantes en la oferta de algunos recursos del ambiente: una menor ocurrencia de precipitaciones principalmente en la etapa de definición del rendimiento (acompañado de una mayor demanda atmosférica) en los cultivos de verano y una mayor ocurrencia de elevadas temperaturas durante el periodo crítico de determinación del número de granos en el maíz y la soja o en el periodo de llenado de granos en el trigo afectando en forma negativa el rendimiento. Con lo cual, estrategias de mayor eficiencia en el uso del agua o incrementar la disponibilidad de agua (riego, napa freáticas) en estas fechas de siembra que no son las óptimas resultaría en la reducción de las brechas de rendimiento.

La primera parte de la hipótesis de esta tesis, donde se planteaba que el rendimiento potencial del cultivo de soja es más alto y las brechas entre el Rendimiento Potencial y el Rendimiento Máximo Alcanzable en seco son menores en las fechas de siembras más tempranas dado por una mayor oferta de radiación solar y agua, es rechazada, ya que el máximo rendimiento potencial se logró únicamente en el primer año en la fecha de siembra temprana y las menores brechas de rendimiento en el cultivo se obtuvieron en las fechas de siembra Intermedias. Esta situación probablemente se deba a que el segundo año hubo un menor aporte de precipitaciones, una mayor acumulación de radiación solar y las temperaturas máximas fueron elevadas durante el periodo crítico del cultivo (por encima de los 30°C) por lo que el rendimiento tanto potencial como máximo alcanzable en seco se vieron afectados. Por otro lado, en la hipótesis se planteó que el número de vainas por unidad de superficie sería el componente numérico que mejor explicara esta brecha también es rechazado, ya que no mostró una tendencia clara respecto a las variaciones en las brechas (un año la mayor brecha en el NV se dio en la fecha siembra temprana y en el otro año se dio en la fecha siembra intermedia).

En relación a la segunda hipótesis de esta tesis donde se planteaba que el rendimiento potencial en el cultivo de maíz se maximiza en las fechas de siembras tempranas debido a una mayor oferta de radiación solar y las brechas entre el rendimiento potencial y el máximo alcanzable en seco son menores al atrasar la fecha de siembra condicionado por un régimen hídrico más favorable para el crecimiento del cultivo fue rechazada. Ya que el máximo rendimiento potencial solo se dio en un año en la fecha más temprana (el otro año se observó el máximo rendimiento potencial en la fecha siembra intermedia) al igual que las brechas relativas de rendimiento (fue menor en un solo año. En

cuanto al número de granos por espiga, la hipótesis se acepta porque este componente numérico fue el que mejor explicó las brechas de rendimiento en ambos años evaluados.

Por otra parte, la tercera hipótesis planteada en esta tesis relacionada con el cultivo de trigo, que decía que las fechas de siembras tempranas maximizan el rendimiento potencial porque expone al periodo alrededor de antesis a una menor temperatura media y aun con una menor radiación solar respecto de fechas de siembras más tardías, incrementando el número y peso de los granos, se acepta porque en las fechas de siembras tempranas de ambos años se alcanzaron los máximos rendimientos potenciales. En cuanto a las brechas de rendimiento, estas fueron menores en la siembra temprana de un solo año, mientras que en el segundo fue en la siembra intermedia por lo tanto se rechaza esta parte de la hipótesis. Respecto a la hipótesis planteada para el número de granos por unidad de superficie es aceptada ya que este componente del rendimiento presentó el mismo patrón al atrasar la fecha de siembra que las brechas de rendimiento.

Es de amplio conocimiento que la magnitud de la brecha de rendimiento de un área determinada está en función de la distribución de las lluvias (Asseng et al., 2001), esto determinará el rendimiento máximo alcanzable en seco, el que a su vez define el tamaño de las brechas relativas entre el RP y el RAs.

En este estudio se demostró que ante variaciones climáticas el RP tendió a ser más estable que el RAs. Por otro lado se observó que independientemente de la fecha de siembra, los valores de brecha resultante en este trabajo entre el RP y el RAs fueron reducidos (< 20%) y el manejo del agua (uso de riego o el aprovechamiento de napas freáticas) puede afectar la magnitud de esta brecha. En consecuencia las posibilidades de mejorar la producción mediante el manejo son más difíciles, y será necesario generar estrategias que apunten a hacer más eficiente el uso de los recursos y los insumos.

En el cultivo de soja, esta brecha se incrementó al atrasar la fecha de implantación, no así en el cultivo de trigo y maíz donde no presentaron una clara tendencia en las brechas al atrasar la siembra. El tamaño relativo de las brechas de rendimiento en soja al atrasar las fechas de siembras fueron menores respecto al maíz. Esto pudo deberse a la plasticidad que tiene el cultivo de soja durante su crecimiento y desarrollo para compensar en parte su rendimiento ante situaciones de estrés durante la determinación del mismo, en tanto que el maíz se mostró más sensible frente a cambios en las condiciones ambientales. Con lo cual las acciones para disminuir estas brechas en el cultivo de maíz deberían centrarse en la elección de fechas de siembra más tempranas y en esta región del sur de Santa Fe en las fechas tardías mediante un manejo estratégico del cultivo (elección genotipo, fertilización: dosis y momento, densidad).

En el cultivo de trigo las brechas de rendimiento aumentaron en las fechas de siembras intermedias y tardías según el año que se considere desde un 3 hasta un 39% debido a una reducción de los RAs dado que las variaciones en los RP con el retraso de la siembra fueron relativamente menores.

El principal aporte de esta investigación fue el conocimiento del límite máximo de producción en ambientes generados por las fechas de siembra en el centro-sur de la provincia de Santa Fe y la cuantificación de la brecha de rendimiento entre el rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzable en seco como también así de los principales componentes numéricos del rendimiento en los cultivos de soja, maíz y trigo con las combinaciones de manejo antes descriptas en el centro-sur de Santa Fe.

En resumen las vías para reducir la brecha entre el RP y el RAs en nuestra zona deben basarse en un correcto manejo del agua, apuntando a la corrección del déficit hídrico durante el periodo crítico de determinación del rendimiento de los cultivos. Esto se lograría en primer lugar mediante la implementación de riego suplementario ya que los análisis de registros históricos de las precipitaciones permiten estimar los momentos determinados en que ocurren esas deficiencias durante el ciclo del cultivo. Por otro lado en el sur de Santa Fe existen zonas donde los suelos presentan las napas freáticas a profundidades entre 1,5 y 2,5 m con lo cual se podría aprovechar el aporte del agua subterránea. Dado que el RAs depende de la ocurrencia de lluvias, otra vía para reducir las brechas RP-RAs es el planteo de las rotaciones de cultivos con un óptimo manejo de los mismos y de su nutrición de lograr una mayor acumulación de agua en el perfil. También la elección de cultivares tolerantes a la sequía aumentaría el RAs. La integración de estas vías incrementaría la producción de granos frente a un escenario climático regional de incertidumbres dado por la erraticidad en las precipitaciones y aumentos en la temperatura global impactando sobre las brechas.

Líneas futuras a seguir... Teniendo en cuenta que en la región pampeana norte las brechas entre rendimiento potencial y el rendimiento máximo alcanzado en seco son bajas o cercanas al 20%, es necesario investigar estrategias que integren los conocimientos de manejo de los cultivos y de la nutrición de los mismos para hacer un uso eficiente del agua y poder capturar una fracción de la brecha RP-RAs.

En los tres cultivos se propone realizar experimentos que incrementen su producción, para ello es necesario un estudio probabilístico mediante el uso de modelos de simulación de cultivos que indiquen la proporción de años sin limitaciones hídricas donde esta brecha sea posible de explotar. Además de esto se sugiere que los cultivos se combinen con

distintos factores de manejo tales como la reducción de entresurcos, la densidad de siembra, el uso de genotipos de altos rendimientos, el agregado de fertilizantes con macronutrientes (Fósforo y Azufre), la fertilización nitrogenada y la aplicación de micronutrientes (ej. Zinc y Cobre en trigo) en las dosis y momentos en que los cultivos más los demanden con el fin de reducir la brecha entre el rendimiento potencial y el máximo alcanzable en seco y obtener granos de buena calidad. En el caso de los cultivos de trigo y maíz se podría mejorar la eficiencia en el uso del agua a través de aplicaciones en dosis divididas de Nitrógeno en distintas etapas de desarrollo de los cultivos utilizando fertilizantes nitrogenados de liberación lenta, ya que estos cultivos mostraron respuestas variables frente a este macronutriente no solo en siembras de primera sino en tardías o de segunda.